

**ANALISIS DOSIS PADA PENYEMBUHAN KANKER
PAYUDARA DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*
(BNCT) MENGGUNAKAN MCNP X**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains**



**Oleh
Norma Ayu Rahmawati
NIM. 10306141015**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2014**

PERSETUJUAN

SKRIPSI

**ANALISIS DOSIS PADA PENYEMBUHAN KANKER PAYUDARA
DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT)
MENGUNAKAN MCNPX**

Skripsi ini
Telah Memenuhi Persyaratan dan Siap Untuk Diuji
Disetujui dan Disahkan pada

Tanggal : 21 November 2016

Untuk dipertahankan di depan Panitia Penguji Skripsi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta

Menyetujui

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Prof. Ir. Y. Sardjono, A.P.U.

Denny Darmawan, M.Sc.

NIP. 19590610 198103 1 002

NIP. 19791202 200312 1 002

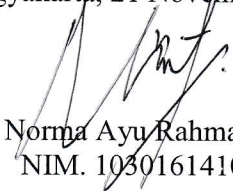
SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Norma Ayu Rahmawati
NIM : 10306141015
Program Studi : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : Analisis Dosis pada Penyembuhan Kanker Payudara
dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT)
Menggunakan MCNP X

Menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya sendiri dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali sebagai kutipan dengan mengikuti pedoman tata tulisan karya ilmiah yang telah lazim. Adapun semua kutipan didalam skripsi ini telah saya sertakan nama pembuatnya/penulisnya dan telah saya cantumkan ke dalam daftar pustaka Apabila pernyataan saya tidak benar, sepenuhnya merupakan tanggung jawab saya.

Yogyakarta, 21 November 2016






Norma Ayu Rahmawati
NIM. 103016141015

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul "**Analisis Dosis pada Penyembuhan Kanker Payudara dengan Boron Neutron Capture Thrapy (BNCT) Menggunakan MCNPX**" yang disusun oleh Norma Ayu Rahmawati, NIM (10306141015) ini telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada tanggal 02 Desember 2016 dan dinyatakan **LULUS**.

Susunan Dewan Penguji

Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
1 Prof. Ir. Y. Sardjono, A.P.U	Ketua Penguji		23/12/16
2 Denny Darmawan, M.Sc.	Sekretaris Penguji		22/12/16
3 Nur Kadarisman, M.Si.	Penguji I		22/12/16

Yogyakarta, 23 Desember 2016

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Dekan,



Dr. Hartono

NIP. 19620729 198702 1 002

SKRIPSI

ANALISIS DOSIS PADA PENYEMBUHAN KANKER PAYUDARA DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) MENGUNAKAN MCNPX

Oleh:

Norma Ayu Rahmawati

NIM. 10306141015

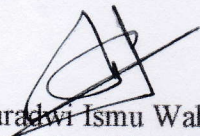
Telah Disetujui dan Disahkan

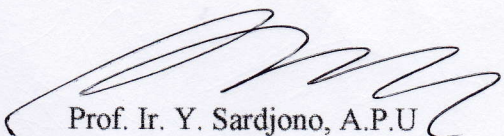
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA BATAN) Yogyakarta

Pada Tanggal:

Kepala Bidang Fisika Partikel

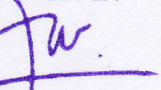
Pembimbing di PSTA-BATAN


Ir. Puradwi Ismu Wahyono, D.E.A
NIP. 19611025 198810 1 001


Prof. Ir. Y. Sardjono, A.P.U
NIP. 19590610 198103 1 002

Menyetujui
Kepala PSTA BATAN




Dr. Susilo Widodo
NIP. 19580414 198003 1 005

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. Al –Insyirah: 5-6)

Buah Karya ini Kupersembahkan untuk:

Bapak Harjono dan Ibu Siti Karomah tercinta, serta Mas Nur Wahid-Mbak Indrayati, Mas Wahyudi-Mbak Ova, Mas Nanang Arifin- Mbak Dwi Astuti tersayang, yang tidak pernah berhenti untuk mendoakan, memberikan motivasi, kesabaran dan ketabahan beliau dalam membimbingku, Terimakasih atas cucuran keringat dan air mata untuk keberhasilan dan kesuksesanku.

Sahabatku Rawi Pramusinta dan Siti Rosidah, yang telah begitu banyak meluangkan waktu dan tenaganya untuk membantuku, hanya untaian kata terimakasih untuk pengorbanan kalian, semoga semoga kita selalu diberikan kemudahan dalam mencapai kesuksesan, Amiin..

Mas Ilma dan Mbak Dwi, Buyung, Dika, terimakasih atas bantuan, pengorbanan waktu, dan ilmunya semoga kalian selalu diberikan kesehatan dan mudah-mudahan ilmu kalian akan selalu bermanfaat.

Estuningsih, Hesti, Kholidah, Mas Supri, Mbak Amri serta Teman-teman pengurus GEMMA Tobratan terimakasih banyak untuk semangat dan bantuan kalian, yang membuatku bisa menyelesaikan Skripsi ini, sukses untuk kalian.

Spesial thanks untuk sahabatku, temean sekelas Fisika B 2010 terimakasih semuanya yang kalian berikan untukku, semangat, tawa, canda, pengorbanan, keringat dan tempat untuk berbagi..kalian yang terbaik. Tetaplah menjadi sahabatku selamanya, mudah-mudahkan jalan kesuksesan terbuka untuk kita semua Allahuma amiin.

**ANALISIS DOSIS PADA PENYEMBUHAN KANKER PAYUDARA
DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT)
MENGUNAKAN MCNP X**

Oleh
Norma Ayu Rahmawati
10306141015

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk Mengetahui pengaruh konsentrasi boron-10 terhadap laju dosis dan lamanya waktu iradiasi untuk terapi *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) dalam penyembuhan kanker payudara. Perkiraan laju dosis yang diterima oleh tubuh dari terapi BNCT dan waktu iradiasi dibutuhkan untuk memastikan dosis yang diterima jaringan kanker cukup.

Penelitian ini berupa simulasi dengan program MCNPX dengan cara mendefinisikan geometri dan komponen penyusun payudara sebagai objek yang diteliti dan sumber radiasi yang digunakan. Keluaran yang didapatkan dari simulasi MCNPX adalah fluks neutron dan dosis hamburan neutron yang keluar dari kolimator. Nilai fluks neutron digunakan untuk menghitung dosis yang berasal dari interaksi neutron dengan material di jaringan.

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa laju dosis pada jaringan kanker untuk dosis boron 20 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,0531 Gy/detik dengan waktu iradiasi 941,16 detik atau 15,7 menit, 25 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,0756 Gy/detik dengan waktu iradiasi 661,75 detik atau 11 menit, 30 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,0867 Gy/detik dengan waktu iradiasi 576,82 detik atau 9,6 menit dan 35 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,098 Gy/detik dengan waktu iradiasi 510,44 detik atau 8,5 menit, 40 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,109 Gy/detik dengan waktu iradiasi 458,67 detik atau 7,6 menit dan 45 $\mu\text{g/g}$ kanker adalah 0,12 Gy/detik dengan waktu iradiasi 415,60 detik atau 6,9 menit. Waktu iradiasi untuk jaringan kanker semakin singkat saat konsentrasi boron pada jaringan semakin tinggi.

Kata-kata kunci : BNCT, kanker payudara, MCNPX

THE DOSAGE ANALYSIS OF BREAST CANCER HEALING WITH BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) BY USING MCNP X

by
Norma Ayu Rahmawati
10306141015

Abstract

This research was aimed to know the effect of the concentration of boron-10 to the dose rate and duration of irradiation for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) in the treatment of breast cancer. The values are needed to make sure that the dosage accepted by cancer tissue is adequate.

This research was simulation with MCNPX program. It was carried out by defining the breast geometry and component as the objects being researched and the source of radiation being used. The result of the simulation was neutron flux and the neutron scattered dosage coming out from collimator. The neutron flux was used to calculate the dosage coming from interaction between neutron and material in the tissue.

Based on the result, it can be known that the dosage rate on cancer tissue for boron dosage of 20 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0.0531 Gy/second with the duration of 941.16 second or 15.7 minutes, 25 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0,0756 Gy/second with the duration of irradiation is 661,75 second or 11 minutes, 30 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0,0867 Gy/second with the duration of irradiation is 576,82 second or 9,6 minutes and 35 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0,098 Gy/second with the duration of irradiation is 510,44 second or 8,5 menit, 40 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0,109 Gy/second with the duration of irradiation is 458,67 second or 7,6 minute and 45 $\mu\text{g/g}$ of cancer is 0,12 Gy/second with the duration of irradiation 415,60 second or 6,9 minute.

Key words : BNCT, breast cancer, MCNPX

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan berkah nikmat yang tak terhingga, kekuatan dan kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir dengan judul **“Analisis Dosis pada Penyembuhan Kanker Payudara dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Menggunakan MCNP X ”**. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna memperoleh gelar sarjana pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan bimbingan baik dukungan moril, spiritual maupun materil, dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk itu dengan segala kerendahan dan ketulusan hati, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kepala PSTA BATAN Dr. Susilo Widodo yang telah memberikan izin melaksanakan penelitian di PSTA- BATAN dan membantu mengesahkan penyusunan skripsi
2. Bapak Prof. Dr. Rochmat Wahab, M.Pd, M.A selaku Rektor Universitas Negeri Yogyakarta yang telah memberikan izin untuk penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Hartono, selaku Dekan FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, yang telah membantu pengesahan skripsi ini.

4. Bapak Prof. Sardjono, Ir selaku Dosen Pembimbing I dengan penuh kesabaran dan perhatian telah membimbing, memberikan arahan, serta motivasi sampai penelitian dan penulisan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
5. Bapak Denny Darmawan, M.Sc selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bimbingan serta saran dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh jajaran Dosen Jurusan Fisika Universitas Negeri Yogyakarta atas bantuan yang diberikan untuk kelancaran tugas akhir ini.
7. Kedua Orang tuaku dan kakak-kakakku yang tidak henti-hentinya mendoakan, memberikan dorongan, motivasi, dan fasilitas sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan lancar.
8. Ilma Muslih, Dwi Wahyuningsih dan sahabat-sahabatku yang senantiasa membantu dan memberikan semangat untuk kelancaran tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terimakasih atas segala bantuannya semoga Allah S.W.T. memberikan ganti pahala.

Meskipun penulis telah berusaha semaksimal mungkin, namun penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih banyak kekurangan. Namun demikian, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi perkembangan Fisika di Indonesia, serta bermanfaat untuk penelitian selanjutnya.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 20 November 2016

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	5
C. Pembatasan Masalah.....	6
D. Perumusan Masalah.....	6
E. Tujuan Penelitian.....	7
F. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II. KAJIAN PUSTAKA.....	8
A. Deskripsi Teori.....	8
1. Carcinoma Mammae.....	8

2. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT).....	10
a. Agen Pembawa Boron-10.....	12
b. Sumber Neutron.....	13
c. Dosis Kanker.....	16
3. Metode Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP).....	18
4. Dosimetri Radiasi.....	20
5. Reaktor Kartini.....	23
a. Teras Reaktor.....	24
b. Moderator.....	24
c. Reflektor.....	25
d. Tabung Berkas Neutron.....	25
e. Kisi Reflektor.....	26
f. Batang Kendali.....	26
g. Tangki Reaktor.....	26
h. Kolom Termal.....	27
i. Bahan Bakar.....	27
j. Rak Putar (Lazy Suzan).....	27
k. Pneumatic Transfer Sistem.....	28
l. Saluran Tengah.....	28
B. Penelitian yang Relevan.....	29
C. Kerangka Berpikir.....	29
BAB III. METODE PENELITIAN.....	30
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	30

B. Instrumen Penelitian.....	30
1. Perangkat Keras.....	30
2. Perangkat Lunak.....	30
3. Data Material dan Dimensi Geometri Breast Cancer.....	31
C. Variabel Penelitian.....	31
a. Variabel Bebas.....	31
b. Variabel Terikat.....	31
c. Variabel Kontrol.....	31
D. Alur Penelitian.....	32
E. Algoritma MCNPX.....	33
1. Input MCNPX.....	33
a. Cell card.....	33
b. Surface card.....	34
c. Data card.....	35
2. Running MCNPX.....	36
3. Output MCNPX.....	36
F. Metode Perhitungan Dosis Radiasi.....	37
1. Perhitungan jumlah atom dalam jaringan.....	37
2. Perhitungan laju dosis.....	38
a. dosis alfa.....	38
b. dosis proton.....	38
c. dosis gamma.....	39

BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	40
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
A. Kesimpulan.....	51
B. Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....	52
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	60
LAMPIRAN 1.....	60
LAMPIRAN 2.....	67
LAMPIRAN 3.....	69
LAMPIRAN 4.....	72
LAMPIRAN 5.....	73
LAMPIRAN 6.....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perkiraan terjadinya kasus kematian akibat kanker di seluruh dunia pada tahun 2012.....	2
Tabel 2. Perkiraan kasus kematian dan prevalensi di seluruh dunia pada tahun 2012.....	3
Tabel 3. Perbandingan Tampang Lintang.....	13
Tabel 4. Keluaran Kolimator Kolom Termal.....	15
Tabel 5. Rekomendasi IAEA untuk neutron keluaran kolimator.....	15
Tabel 6. Jenis tally yang disediakan oleh MCNP.....	20
Tabel 7. Faktor Bobot Radiasi.....	22
Tabel 8. Faktor Bobot Organ.....	23
Tabel 9. Jenis Input Cell Card.....	34
Tabel 10. MCNPX Surface Card.....	34
Tabel 11. Kode Tally pada MCNPX.....	35
Tabel 12. Keluaran kolimator kolom termal.....	40
Tabel 13. Keluaran kolimator dengan titik sumber.....	41
Tabel 14. Fluks neutron dengan dosis boron 45 μ gram/gram tumor.....	44
Tabel 15. Laju dosis dan waktu iradiasi pada jaringan kanker.....	47
Tabel 16. Perbandingan dosis serap tiap jaringan antara konsentrasi 20 sampai 45 μ gram / gram tumor.....	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Invasive Lobular Carcinoma.....	9
Gambar 2. Reaksi Inti Boron dengan Neutron $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$	11
Gambar 3. Urutan kejadian nuklir.....	12
Gambar 4. Skema Teras Reaktor TRIGA.....	24
Gambar 5. Digram Alir Penelitian.....	32
Gambar 6. Algoritma MCNPX pada perhitungan fluks neutron.....	33
Gambar 7. Proses Running MCNPX.....	36
Gambar 8. File Output MCNPX.....	36
Gambar 9. Model Kolimator Kolom Termal Reaktor Kartini.....	40
Gambar 10. Model kolimator dengan titik sumber di (0,2,0)	41
Gambar 11. Pemodelan payudara dan jaringan kanker dilihat dari samping.....	43
Gambar 12. Model bentuk simulasi potongan payudara dilihat dari samping.....	44
Gambar 13. Distribusi fluks neutron dalam payudara.....	45
Gambar 14. Hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis.....	47
Gambar 15. Hubungan antara konsentrasi boron dengan waktu iradiasi.....	48
Gambar 16. Hubungan antara dosis serap dengan jaringan payudara.....	48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Contoh code input MCNPX.....	61
Lampiran 2. Contoh perhitungan massa boron-10 pada tiap jaringan.....	68
Lampiran 3. Contoh perhitungan laju dosis.....	70
Lampiran 4. Tabel Perbandingan laju dosis dengan konsentrasi boron-10.....	71
Lampiran 5. Tabel fraksi dosis gamma.....	72
Lampiran 6. Tabel Data material.....	72

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perlu diketahui di era modern ini, penyakit yang menyerang manusia semakin banyak macamnya. Mulai dari penyakit tidak menular hingga penyakit yang menular. Kanker merupakan salah satu penyakit yang tidak menular dan kebanyakan ditemukan di negara-negara berkembang (IAEA, 2014). Kanker atau *Neoplasma* adalah penyakit yang ditandai dengan kelainan siklus sel yang menyebabkan sel tumbuh tidak terkendali dan menyerang jaringan lainnya, juga dapat bermigrasi ke jaringan tubuh lainnya melalui sirkulasi darah atau sistem limfatik atau biasa disebut dengan metastasis (*World Cancer Report*, 2014). *World Health Organization* (WHO, 2012) mengungkapkan bahwa di seluruh dunia pada tahun 2008 – 2012 ada 14,1 juta kasus kanker baru, 8,2 juta di antaranya meninggal dan 32,6 juta hidup dengan kanker. GLOBOCAN (2012) memperkirakan akan terjadi peningkatan kasus baru mengenai kanker di tahun 2025, yaitu sebesar 19,3 juta atau sekitar 56,8% di seluruh dunia. Berdasarkan Tabel 1 yang menunjukkan estimasi kejadian, kematian dan prevalensi di tahun 2012 untuk semua jenis kanker tidak termasuk kanker kulit (*non-melanoma*) nampak bahwa angka kematian pria lebih besar dibandingkan dengan angka kematian wanita yaitu sekitar 25%. WHO (2014) memperkirakan bahwa di Asia Tenggara ada sekitar 1,7 juta kasus kanker baru yang muncul setiap tahunnya. Bagi perempuan di daerah berkembang, kanker payudara dan leher rahim adalah kanker yang paling umum, sementara paru-paru dan kanker rongga mulut adalah yang paling umum untuk laki-laki

Tabel 1. Perkiraan terjadinya kasus kematian akibat kanker di seluruh dunia pada tahun 2012 (WHO, 2012)

Jumlah estimasi (ribuan)	Pria			Wanita			kedua jenis kelamin		
	kasus	Kemati-an	5tahun lalu	kasus	Kemati-an	5tahun lalu	kasus	Kemati-an	5tahun lalu
Dunia	7427	4653	15362	6663	3548	17182	14090	8202	32545
Negara maju	3244	1592	8616	2832	1287	8297	6076	2878	16913
Negara berkembang	4184	3062	6747	3831	2261	8885	8014	5323	15632
WHO wilayah Afrika(AFRO)	265	205	468	381	250	895	645	456	1363
WHO wilayah Amerika (PAHO)	1454	677	3843	1429	618	4115	2882	1295	7958
WHO wilayah mediterania timur	263	191	461	293	176	733	555	367	1194
WHO wilayah Eropa (EURO)	1987	1081	4857	1750	852	4933	3737	1933	9790
WHO Wilayah Asia Tenggara (SEARO)	816	616	1237	908	555	2041	1724	1171	3278
WHO Wilayah Pasifik Barat (WPRO)	2642	1882	4493	1902	1096	4464	4543	2978	8956
Negara anggota IARC (24 negara)	3706	1900	9259	3354	1570	9425	7060	3470	18684
Amerika Serikat	825	324	2402	779	293	2373	1604	617	4775
China	1823	1429	2496	1243	776	2549	3065	2206	5045
India	477	357	665	537	326	1126	1015	683	1790
Uni Eropa (EU-28)	1446	716	3759	1211	561	3487	2657	1276	7246

* Semua kanker (tidak termasuk kanker kulit non-melanoma)

WCR (*World Cancer Report*, 2014) melaporkan bahwa ada 5 kanker yang sering terjadi pada wanita yaitu kanker payudara, *colorectum*, paru-paru, leher rahim, dan kanker perut. Kanker payudara (*breast cancer*) merupakan kanker yang paling ditakuti oleh wanita pada umumnya dan diperkirakan terdapat 1,67 juta kasus baru yang sudah didiagnosis yaitu sekitar 25% dari semua kanker (Joanna , 2014). Kanker payudara merupakan pembunuh nomor satu dan masalah utama bagi kesehatan perempuan di daerah-daerah berkembang, yaitu 324.000 kasus kematian dari total 14,3%. Di negara maju, kanker payudara menduduki peringkat kedua setelah kanker paru-paru yaitu 198.000 kasus kematian dari 15,4% total kasus kematian (GLOBOCAN, 2012 ; Mostafa *et.al*, 2014). Hal ini

dapat dilihat pada Tabel 2 tentang perkiraan kasus kematian dan prevalensi di seluruh dunia pada tahun 2012 oleh WHO (2012).

Tabel 2. Perkiraan kasus kematian dan prevalensi di seluruh dunia pada tahun 2012 (WHO, 2012).

Jumlah estimasi (ribuan)	Kasus	Kematian	5 tahun lalu
Dunia	1677	522	6255
Negara maju	794	198	3224
Negara Berkembang	883	324	3032
WHO Wilayah Afrika (AFRO)	100	49	318
WHO Wilayah Amerika (PAHO)	408	92	1618
WHO Wilayah Mediterania Timur	99	42	348
WHO Wilayah Eropa (EURO)	500	143	1960
WHO Wilayah Asia Tenggara(SEARO)	240	110	735
WHO Wilayah Pasifik Barat (WPRO)	330	86	1276
24 Negara Anggota IARC	940	257	3614
Amerika Serikat	233	44	971
China	187	48	697
India	145	70	397
Uni Eropa (EU-28)	367	92	1467

Di Indonesia dengan jumlah penduduk mencapai 247 juta jiwa pada tahun 2000-2012, lebih dari 1,5 juta jiwa meninggal, salah satunya akibat kanker. Pada laki-laki, dari 1031 kasus kematian, 60,7%-nya adalah akibat dari kanker, sedangkan untuk perempuan 56,9% kasus. Dari beberapa kanker yang paling dominan adalah kanker payudara yaitu 21,4% (WHO, 2014). Hal tersebut sebagai dasar bagi peneliti untuk melakukan penelitian ini.

Kanker payudara adalah kanker yang terjadi karena terganggunya sistem pertumbuhan sel di dalam jaringan payudara. Payudara tersusun atas kelenjar susu, jaringan lemak, kantung penghasil susu, dan kelenjar getah bening. Sel abnormal bisa tumbuh di empat bagian tersebut, dan mengakibatkan kerusakan yang lambat tetapi pasti menyerang payudara (Zhou *et.al*, 2014).

Saat ini cara pengobatan medis yang dilakukan untuk menekan laju pertumbuhan kanker payudara di Indonesia belum memadai. Pengobatan atau terapi yang sering dilakukan yaitu dengan menggunakan sinar gamma dan sinar-X yang dapat membunuh sel kanker, tapi juga membunuh sel-sel normal (Huang, 2009). Pada tahap awal kanker, para pasien dianjurkan untuk melakukan operasi pengangkatan yang kemudian dilanjutkan dengan *chemotherapy* (Ciprian *et.al*, 2013). Namun dalam melakukan terapi masih ada efek samping yang ditimbulkan, bahkan setelah melakukan operasi pengangkatan sel kanker. Dari 880 perempuan yang didiagnosis menderita *breast cancer* dan sudah menjalankan operasi pengangkatan pada Januari tahun 2000 hingga Desember 2010, 60 persen di antaranya terjadi rekurensi atau kekambuhan dengan usia rata-rata 48 tahun (Juliana *et.al*, 2014).

Hal ini membuat para ilmuwan medis Indonesia berlomba-lomba untuk membuat suatu rancangan yang dapat digunakan untuk memberantas penyakit kanker, khususnya kanker payudara dengan meminimalisasi dampak setelahnya. Para ilmuwan luar negeri telah menemukan cara yang tepat untuk membunuh sel kanker, yaitu dengan menggunakan terapi boron. Terapi boron atau lebih dikenal dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) adalah modalitas pengobatan biner yang melibatkan akumulasi selektif dari pembawa ^{10}B pada kanker yang diikuti oleh penyinaran dengan berkas neutron termal maupun epitermal (Fernanda *et.al*, 2012). BNCT merupakan pengobatan yang ideal dalam membunuh sel-sel kanker secara selektif tanpa merusak sel sehat di sekitarnya (Leena *et.al*, 2012). Keunggulan lain BNCT adalah efek radiasi dapat dibatasi

pada sel-sel kanker. Dosis radiasi pada BNCT sangat bergantung pada distribusi boron dalam kanker (Hitoshi *et.al*, 2011 ; Emiliano *et.al*, 2013).

Penelitian ini akan mempelajari tentang dosis serap pada kanker payudara, yaitu dengan membatasi dosis yang ditembakkan dalam sel, sehingga sel-sel yang sehat tidak ikut rusak atau dengan kata lain batas dosis aman untuk terapi BNCT. MCNP5 digunakan untuk membantu dalam terapi BNCT ini. Dengan cara mensimulasi *fluks neutron* yang masuk dalam jaringan kanker sehingga kanker dapat ditembak dengan tepat tanpa harus merusak jaringan yang lain, kemudian dikembangkan dengan menggunakan MCNP X yang memiliki keluaran yang lebih sempurna dibandingkan dengan MCNP5. Salah satu contoh dan yang akan diterapkan dalam penelitian ini adalah MCNP X dapat mengetahui dosis serap boron agar dapat menembak target dengan tepat.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Banyaknya jumlah kematian yang disebabkan oleh kanker payudara dan belum ada metode yang efektif untuk mengobatinya, selain dengan operasi, kemoterapi dan radioterapi.
2. Kanker payudara merupakan salah satu kanker yang paling banyak menyerang para wanita di dunia
3. Boron-10 merupakan nuklida non radioaktif yang dapat digunakan untuk menyembuhkan kanker dengan metode BNCT dan masih belum maksimal dalam penggunaannya.

C. Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini permasalahan dibatasi oleh :

1. Ukuran kanker diasumsikan 3 cm.
2. Letak kanker adalah di bagian lobus.
3. Jenis kanker payudara yang dipilih adalah *Infiltrating Lobular Carcinoma (ILC)*.
4. Sumber neutron yang digunakan adalah sumber neutron hasil keluaran kolimator desain dari Desain Konseptual Kolimator Neutron di Kolom Termal Reaktor Riset Kartini untuk *Boron Neutron Capture Therapy* (Fauziah, 2013).
5. Pembagian konsentrasi dari total boron-10 yang dilakukan pada penelitian adalah 90% pada jaringan inti kanker, 2,5% untuk CTV, PTV dan jaringan sehat.

D. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi serta pembatasan masalah maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi boron-10 terhadap laju dosis untuk pengobatan kanker payudara?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi boron terhadap lamanya waktu iradiasi untuk pengobatan kanker payudara?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah:

1. Mengetahui pengaruh konsentrasi boron-10 terhadap laju dosis untuk pengobatan kanker payudara.
2. Mengetahui pengaruh konsentrasi boron terhadap lamanya waktu iradiasi untuk pengobatan kanker payudara.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat dimanfaatkan sebagai referensi untuk keperluan eksperimen uji *in vivo* dan *in vitro* pada BNCT menggunakan sumber dari Reaktor Kartini.
2. Melengkapi penelitian yang telah ada sebelumnya mengenai terapi BNCT.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

A. Deskripsi Teori

1. *Carcinoma Mammæ*

Carcinoma mammae adalah suatu penyakit di mana sel-sel normal tubuh berubah menjadi sel-sel kanker pada jaringan payudara. Adapun jenis-jenis kanker payudara adalah sebagai berikut (Fattaneh *et.al*, 2003):

- a. *Lobular carcinoma in situ* (NBCC, 2003).
- b. *Ductal carcinoma in situ* (Badrudjoja, 2012).
- c. *Infiltrating lobular carcinoma* (Fattaneh *et.al*, 2003)
- d. *Infiltrating ductal carcinoma* (Arlen *et.al*, 2011).
- e. *Modullary carcinoma* (Bastings *et.al*, 2013).
- f. *Mucinous carcinoma (colloid carcinoma)* (Fattaneh *et.al*, 2003).
- g. *Tubular Carcinoma* (Rakha *et.al*, 2010).
- h. *Inflammatory breast cancer* (Breonna, 2012) .
- i. *Paget's disease of the nipple* (Ikuko *et.al*, 2012).

Dari macam-macam kanker di atas, dalam penelitian ini hanya akan dibahas jenis *infiltrating lobular carcinoma*. *Infiltrating lobular carcinoma* (ILC) atau *invasive lobular carcinoma* adalah salah satu jenis kanker payudara yang berasal dari lobus payudara lalu menyerang jaringan lain yang berada di sekitar payudara. *Infiltrating lobular carcinoma* sulit dilihat melalui mammogram, tidak seperti kanker payudara *invasive* lainnya seperti *invasive ductal carcinoma* (Chiang *et.al*, 2013).



Gambar 1. *Invasive Lobular Carcinoma* (Fattaneh *et.al*, 2003).

Pada umumnya *infiltrating lobular carcinoma* akan muncul dalam bentuk penebalan pada area payudara dan bukan muncul dalam bentuk benjolan. Sel *infiltrating lobular carcinoma* akan merusak *lobulus* sebelum akhirnya menyebar ke jaringan lain (metastasis) dengan membuat bentuk mirip jaring-jaring yang berada di sekitar payudara. Sebelum berubah menjadi lebih ganas, *infiltrating lobular carcinoma* yang berubah menjadi *invasive Lobular Carcinoma* (ILC) seperti pada Gambar 1, akan memiliki dimensi sekitar 2-5 cm yang disertai dengan beberapa gejala, yaitu: (1) salah satu bagian payudara mengalami penebalan pada satu area. (2) pada payudara akan muncul satu area baru yang bengkak dan terlihat penuh. (3) adanya perubahan kondisi atau perubahan tekstur payudara, misalnya adanya pengerutan. (4) mengalami *nipple reaction* (puting susu tertarik ke belakang) (Fattaneh *et.al*, 2003).

Lobular carcinoma in situ (LCIS) adalah kondisi di mana sel abnormal masih berada di dalam *lobule* yang bisa menjadi petunjuk bahwa resiko kanker payudara seseorang mengalami peningkatan. Hampir semua kasus *infiltrating lobular carcinoma* ini dipengaruhi oleh faktor gen CDH1. Gen yang telah mengalami mutasi ini bertugas untuk mengatur aktivitas satu jenis protein yang akan menjaga

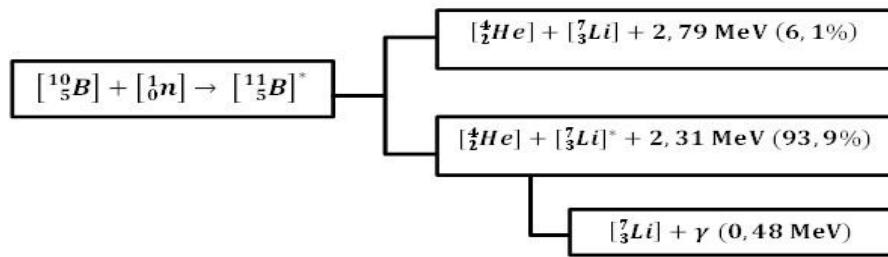
agar sel kanker tidak menyebar dan menyerang jaringan yang masih normal (Greg *et.al*, 2015).

2. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

BNCT adalah ketika ^{10}B disinari dengan neutron termal energi rendah (0,0025 eV) dan menyebabkan produksi perpindahan energi linier tinggi (LET) pada partikel alpha dan inti litium-7 (Takada *et.al*, 2014; Barth *et.al*, 2012).

Sebelumnya pada tahun 1932, *Chadwick* yang berasal dari *Cavendish Lab University of Cambridge* Inggris menemukan neutron. Tiga tahun kemudian, pada tahun 1935, Taylor, Burcham dan Chadwick menunjukkan bahwa boron-10 (^{10}B) memiliki kemampuan untuk menangkap neutron lambat kemudian melepaskan sinar litium-7, partikel alpha dan gamma. Setahun kemudian, orang pertama yang mengusulkan bahwa reaksi ini dapat dimanfaatkan untuk pengobatan kanker adalah G.L. Locher (Alexander, 2014; Wagner *et.al*, 2012).

G.L. Locher adalah seorang biofisikawan dari lembaga Franklin di Pennsylvania. Prinsip fisika dari teknik *Neutron Capture Therapy* ini berdasarkan pada reaksi nuklir yang terjadi ketika boron stabil (boron-10) diiradiasi dengan menggunakan neutron energi rendah (neutron termal). Boron-10 memiliki tampang lintang interaksi tangkapan dengan neutron termal yang tinggi. Reaksi ini menghasilkan partikel alpha dan litium-7. Jangkauan partikel alpha di dalam jaringan sangat pendek sehingga dosis yang diterima oleh jaringan kanker maksimal sedangkan jaringan normal di sekitar kanker menerima dosis seminimal mungkin (Wolfgang *et.al*, 2012). Interaksi yang terjadi antara boron-10 dengan neutron termal ditunjukkan pada Gambar 2.

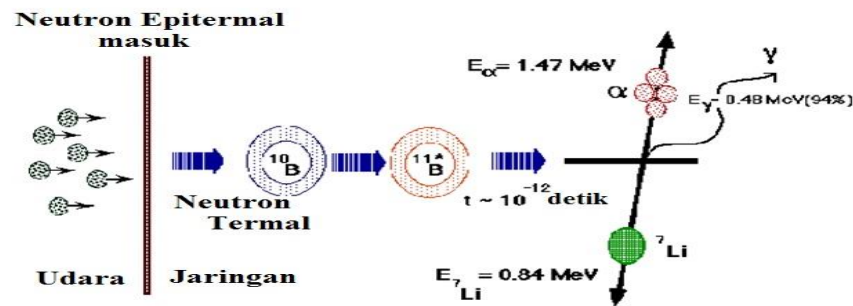


Gambar 2. Reaksi Inti Boron dengan Neutron $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ (Wolfgang *et.al*, 2012).

Locher pada tahun 1936 memiliki ide dasar untuk menggunakan reaksi penangkapan neutron dalam pengobatan kanker : "Secara khusus, terdapat kemungkinan memperkenalkan sejumlah kecil penyerap neutron yang kuat ke daerah di mana diinginkan untuk membebaskan energi ionisasi (ilustrasi sederhana akan injeksi yang larut, senyawa beracun dari boron, lithium, gadolinium atau emas menjadi kanker superfisial, diikuti oleh penembakan dengan neutron lambat) (Chiojdeanu *et.al*, 2009).

BNCT merupakan target kemo-radioterapi yang menggunakan boron-10 yang melekat pada obat kanker. Boron-10 digunakan karena memiliki tangkapan neutron tinggi dengan *cross section* sekitar 4000 barn yang berarti dapat menangkap neutron lambat dengan mudah. Pertama-tama, boron-10 pembawa obat disuntikkan ke dalam darah. Kemudian, kanker terakumulasi obat melalui sistem transportasi darah. Setelah itu, kanker disinari oleh neutron termal ($E \approx 0.0025\text{eV}$) atau neutron epitermal ($1 \text{ eV} < E < 1 \text{ MeV}$) di mana sumber neutron diekstraksi dari reaksi fisi uranium-235 dalam reaktor nuklir. Akhirnya, atom boron-10 di dalam kanker menangkap neutron untuk menghasilkan helium dan

Lithium7 yang menghasilkan partikel alfa sebesar 1,47 MeV untuk membunuh sel-sel kanker, seperti yang disimulasikan pada Gambar 3 (Gann *et.al*,2010).



Gambar 3. Urutan kejadian nuklir (Wolfgang *et.al*, 2012).

Faktor utama dari boron adalah sebagai berikut (Zhu *et.al*, 2013):

a. Agen Pembawa Boron-10

Faktor utama dari keberhasilan BNCT yaitu bergantung pada agen pengiriman boron-10. Untuk menunjang keberhasilan suatu terapi, senyawa terboronasi sebagai agen target (*targeting agent*) yang ideal hendaknya mempunyai karakter sebagai berikut: (1) selektivitas tinggi, (2) toksisitas rendah (3) kelarutan sesuai di dalam air karena sistem dalam sel tersusun sebagian besar berupa air sebagai pelarut, dan (4) penyerapan tinggi oleh sel kanker (Huang, 2009 ; Zarma *et.al*, 2013).

Agen pengiriman boron-10 memiliki tiga generasi. Pertama *Borona Phenylalanine* atau BPA (Shintaro, 2014). BPA dianggap sebagai wakil dari generasi pertama dari senyawa boron-10 dan jenis dari agen pengiriman boron-10 untuk BNCT (Peter, *et.al*, 2013 ; Ryan, *et.al*, 2013). Kedua, Natrium *borocaptate* ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) atau BSH. BSH (*Borona Sulfahydryl*) dapat dianggap sebagai generasi kedua dari senyawa boron-10 dan sebagai jenis agen pembawa boron-10

untuk BNCT. BSH diterapkan dalam uji klinis di Amerika Serikat, Eropa dan Jepang (Suzuki, *et.al*, 2013). Ketiga, pengembangan generasi ketiga dari agen pengiriman boron-10 adalah faktor yang secara langsung paling penting dalam mempengaruhi keberhasilan BNCT. Hal ini dikarenakan hasil klinis dari BPA dan BSH untuk BNCT kurang memuaskan, sehingga muncul agen pengiriman boron generasi ketiga yang mengadopsi kelompok senyawa boron yang sudah stabil ke bagian kanker target. Boron polyhedral, porfirin, asam amino, liposom, poliamina, merupakan beberapa dari agen generasi ketiga (Huang, 2009).

Penggunaan metode BNCT dengan senyawa boron-10 sebagai bahan utamanya dapat dikatakan aman. Hal ini dikarenakan tampang lintang dari boron lebih besar dibandingkan dengan tampang lintang unsur penyusun tubuh. Begitu pula dengan reaksi inti antara neutron termal dengan boron. Tabel 3 menunjukkan perbandingan nilai tampang lintang boron-10 dengan beberapa unsur utama penyusun tubuh terhadap neutron termal.

Tabel 3. Perbandingan Tampang Lintang (Berlianti, 2013)

Nama unsur	Persen massa (%)	Tampang lintang (barns)
Hidrogen	10.5	32.945
Oksigen	63.5	4.4814
Nitrogen	2.5	13,481
Karbon	22.6	5,576
Boron-10	-	3839

b. Sumber Neutron

Sumber neutron adalah kunci lain dari keberhasilan BNCT dalam mengobati kanker. Sumber neutron yang digunakan dalam BNCT dapat berasal dari reaktor

nuklir maupun generator neutron. Neutron yang digunakan adalah neutron termal dan neutron epitermal. Neutron termal merupakan neutron yang memiliki energi 0,0025 eV, sedangkan neutron epitermal merupakan neutron yang memiliki energi 1eV-10 MeV. Neutron termal memiliki daya tembus yang lebih rendah yaitu 2 – 3 cm dari permukaan jaringan, dibandingkan dengan neutron epitermal yaitu 3 – 6 cm, sehingga untuk kanker pada kedalaman tertentu di dalam jaringan dibutuhkan neutron epitermal (John, *et.al*, 2013). Sumber neutron dalam penelitian ini yaitu sumber neutron dari reaktor nuklir Triga Mark.

Nilai tampang lintang dapat mempengaruhi sifat dari masing-masing neutron terhadap boron-10. Tampang lintang sebenarnya adalah suatu kebolehjadian interaksi antara neutron dengan suatu nuklida. Satuan dari tampang lintang sendiri adalah barns. Tampang lintang juga memiliki empat tipe, yaitu tampang lintang serap (σ_a), tampang lintang fisi (σ_f), tampang lintang pemantul (σ_s), dan tampang lintang radioaktif (σ_γ).

Neutron yang dikelola adalah neutron yang keluar melalui kolimator yang memiliki materi pelindung *bismuth* dengan intensitas tinggi, kemudian diarahkan saat rasio antara arus dengan fluks neutron 0,7, pada berkas neutron epitermal dengan gamma rendah, pada neutron termal dan juga adanya kontaminasi dengan neutron cepat. Karakteristik *beam* dan intensitas telah dikonfirmasi dengan pengukuran yang dilakukan oleh tim dosimetri Finlandia dan dengan mengunjungi tim dari *Idaho National Laboratory*, Idaho USA, *Nuclear Research Institute* (NRI) Republik Ceko.

Keuntungan dari menggunakan reaktor TRIGA untuk BNCT adalah stabilitas dan reliabilitas selain intensitas neutron yang tinggi dan radiasi latar *beam* rendah. Salah satu kelemahan dalam menggunakan reaktor nuklir sebagai sumber neutron BNCT jelas lokasinya di lingkungan non-rumah sakit, juga karena posisi *beam* diam (Savolainen, *et.al*, 2013). Kriteria dari neutron yang keluar dari kolimator kolom termal ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Keluaran Kolimator Kolom Termal (Fauziah, 2013)

Parameter	Nilai
Diameter <i>aperture</i> (cm)	1 – 5
$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$7,65 \times 10^8$
$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,76 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,32 \times 10^{-13}$
ϕ_{th}/ϕ_{epi}	0,007
J/ϕ_{epi}	0,73

Tabel 5. Rekomendasi IAEA untuk neutron keluaran kolimator (IAEA, 2001).

Paramaeter	Notasi (Satuan)	Rekomendasi IAEA
Fluks neutron epitermal	$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$> 1,0 \times 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio antara fluks termal dan epitermal	ϕ_{th}/ϕ_{epi}	$< 0,05$
Rasio antara arus neutron dan fluks neutron	J/ϕ_{epi}	$< 0,7$

Besar parameter yang disediakan oleh IAEA disajikan pada Tabel 5. Semua parameter yang terdapat pada Tabel 4 untuk desain kolimator dari kolom termal sudah memenuhi rekomendasi dari IAEA.

Keluaran kolimator yang dibuat berdasarkan standar IAEA memiliki kualitas.

Adapun kualitas neutron didefinisikan sebagai berikut (Muslih, 2013) :

- Komponen neutron cepat

Rentang neutron cepat dalam penelitian ini didefinisikan pada rentang energi di atas 10 keV. Pada neutron cepat, ada berkas radiasi lain yang tidak diinginkan karena karakternya seperti proton dengan LET tinggi dan radikal bebas.

- Komponen sinar gamma

Sinar gamma tidak hanya menyinari volume target saja melainkan sebagian besar jaringan sehat di sekitarnya, maka dari itu komponen ini harus dihilangkan. Di samping berasal dari reaktor, sinar gamma juga dihasilkan melalui reaksi neutron termal dengan hidrogen di dalam tubuh pasien.

- Rasio antara arus neutron total dan fluks neutron total

Nilai ini menunjukkan fraksi neutron yang bergerak ke arah luar atau depan *port*. Nilai yang disarankan adalah lebih besar dari 0,7. Hal ini untuk membatasi divergensi berkas neutron atau mengurangi radiasi luar target yang telah ditentukan, serta untuk membantu fleksibilitas pasien selama pengobatan.

c. Dosis Kanker

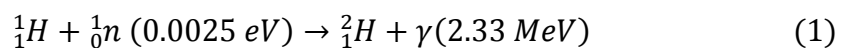
Dalam dosis BNCT terdapat beberapa dosis yang perlu diperhatikan. Hal ini dikarenakan boron-10 yang digunakan untuk pengobatan tidak semuanya terdistribusi di sel kanker saja, melainkan ada kemungkinan terdistribusi ke sel sehat sehingga dapat terkena efek radiasi neutron termal. Selain itu ada beberapa unsur yang berinteraksi dengan neutron termal, misalnya nitrogen dan hidrogen. Berikut adalah beberapa dosis yang perlu diperhatikan dalam BNCT :

- Dosis Boron (D_B)

Dosis boron dihasilkan dari interaksi neutron dengan boron yang telah dimasukkan ke dalam jaringan kanker. Boron memiliki tampang lintang 3863,7 barn, sehingga memiliki peluang yang tinggi untuk berinteraksi. Dari Gambar 2 dapat dijelaskan bahwa boron-10 yang berinteraksi dengan neutron termal akan berubah menjadi boron-11 yang memiliki waktu paro 10^{-12} detik. Kemudian boron-11 meluruh menghasilkan litium dan alfa, yang pertama menghasilkan energi 2,79 MeV (61% dari interaksi total), yang kedua menghasilkan energi 2,31 MeV (93,9% dari reaksi total). Kemudian litium kedua meluruh kembali ke tingkat awal dengan energi gamma sebesar 0,48 MeV. Sehingga didapat energi rerata yang dihasilkan dari interaksi antara neutron dan boron-10 adalah 2,33 MeV (IAEA, 2001).

- Dosis gamma (D_γ)

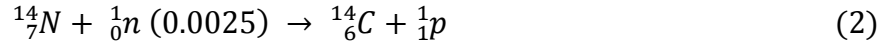
Gamma dan hidrogen-2 dihasilkan dari interaksi neutron termal dengan hidrogen dalam tubuh. Hidrogen-2 merupakan atom tereksitasi, sehingga tidak memiliki waktu paro. Laju produksi hidrogen-2 dari interaksi neutron termal dengan hidrogen-1 sebanding dengan laju pelepasan foton dengan energi 2,33 MeV. Berikut adalah persamaannya (IAEA, 2001) :



Gamma dengan energi 2,33 MeV pada persamaan (1) merupakan akibat dari reaksi neutron termal dengan hidrogen yang dilakukan pada penelitian ini (IAEA, 2001).

- Dosis radiasi proton (D_p)

Unsur-unsur yang memiliki fraksi massa paling tinggi di dalam jaringan adalah Nitrogen. Interaksi antara nitrogen dan neutron termal akan menghasilkan karbon-14 dan proton dengan energi 0,66 MeV. Maka persamaannya adalah :



Persamaan 2 merupakan dasar untuk menghitung dosis proton. Reaksi ini menghasilkan karbon-14 yang merupakan salah satu bahan radioaktif yang memiliki waktu paro 5730 tahun dengan aktifitas radiasi sebesar 3kBq dan dosis ekuivalen sebesar 12 μ Sv/tahun. Dosis ini diabaikan di dalam jaringan tubuh disebabkan karena dosisnya sangat jauh dari ambang batas, sehingga aman bagi tubuh. Karbon-14 juga merupakan isotop alami yang terdapat di dalam tubuh manusia sejak lahir (IAEA,2001).

- Dosis hamburan neutron

Reaktor sebagai sarana iradiasi pasien kanker dan sebagai sumber neutron menghasilkan neutron termal dan epitermal, juga dapat menghasilkan neutron cepat. Namun di dalam neutron cepat terdapat radiasi yang tidak diinginkan seperti proton dengan LET tinggi dan radikal bebas. Sehingga dosis total yang diterima tubuh adalah :

$$D_T = w_B D_B + w_P D_P + w_Y D_Y + w_f D_f \quad (3)$$

dengan D_B , D_P , D_Y dan D_f adalah dosis yang diterima organ, w_B , w_P , w_Y , dan w_f adalah faktor kualitas radiasi atau faktor bobot (IAEA, 2001).

3. Metode *Monte Carlo N-Particle Transport Code* (MCNP)

Program MCNPX atau dapat disebut sebagai *Monte Carlo N-particle eXtended* adalah tujuan umum kode transport Monte Carlo yang dirancang untuk

mengetahui banyaknya jenis partikel dengan rentang energi yang lebih luas. Versi ini adalah lanjutan dari MCNP yang telah dimulai di *Los Alamos National Laboratory* sekitar 60 tahun yang lalu. MCNPX versi 2.6.0 adalah *computer code* terakhir yang dirilis oleh *Radiation Safety Information Computational Center* (RSICC) yang mengikuti MCNPX versi sebelumnya. Pada MCNPX versi 2.6.0 telah dimasukkan beberapa kemampuan baru terutama untuk analisis transmudasi, *burn-up* dan produksi partikel tunda. Beberapa mode perhitungan (*tally*) dan metode baru reduksi varians juga telah dikembangkan untuk teknik analisis data yang lebih baik. MCNPX ini juga sesuai untuk menjalankan kode dari MCNP5 kecuali kode yang terkait fitur-fitur baru yang belum ada di MCNP5. Adapun manfaat MCNPX yang telah ada selama ini adalah sebagai berikut (Denise , 2008; Muslih, 2015):

- Desain akselerator untuk fasilitas hamburan neutron.
- Akselerator berbasis teknologi citra seperti radiografi neutron dan proton.
- Desain perisai teknologi akselerator.
- Dosimetri energi tinggi dan deteksi neutron.
- Fisika medis terutama terapi proton dan neutron.
- Analisis transmudasi aktivasi dan *burn up* di reaktor dan sistem lainnya.
- Analisis keselamatan nuklir.
- Deteksi material nuklir.

Batasan energi radiasi yang dapat disimulasikan yaitu:

- Rentang energi neutron (0-20 MeV) untuk semua isotop.

- Rentang energi neutron (0-150 MeV) untuk 42 isotop tertentu dan hanya sampai 100 MeV untuk ^9Be .
- Rentang energi foton (0-100 GeV).
- Rentang energi elektron (1 KeV- 1 GeV).
- Rentang energi proton (1-150 MeV).

Salah satu keuntungan dari MCNP adalah adanya *tally* yang mampu melakukan perhitungan fenomena teknik nuklir. Masing-masing *tally* mempunyai karakter sendiri. Berikut adalah *tally* dan fungsinya:

Tabel 6. Jenis *tally* yang disediakan oleh MCNP (Booth *et.al.*, 2003)

<i>Tally</i>	Mode Partikel	Deskripsi	Satuan
F1	:N, :P, :E	Arus yang melewati <i>surface</i>	Partikel
F2	:N, :P, :E	Fluks rerata yang melewati <i>surface</i>	Partikel/cm ²
F4	:N, :P, :E	Fluks rerata yang melewati <i>cell</i>	Partikel/cm ²
F6	:N, :P, :N,P	Energi deposisi rerata yang melewati <i>cell</i>	MeV/g
F8	:N, :P, :E, :P,E	Distribusi pulsa energi pada detektor	Pulsa

Surface merupakan batas geometri, sedangkan *cell* merupakan suatu volume geometri yang dibatasi oleh *surface*. *N*, *P* dan *E* mewakili jenis partikel yang digunakan yaitu neutron, foton dan elektron.

4. Dosimetri Radiasi

Dosimetri radiasi merupakan ilmu yang mempelajari tentang besaran dan satuan radiasi, misalnya paparan, dosis serap dan dosis ekuivalen. Paparan adalah kemampuan radiasi gamma untuk menimbulkan ionisasi di udara pada volume tertentu. Satu kali paparan dapat didefinisikan sebagai jumlah radiasi gamma yang membawa muatan sebesar 1 coulomb (Attix, 1986). Namun besaran paparan ini

belum cukup untuk mendefinisikan dampak atau efek radiasi ke bahan lainnya, sehingga dibutuhkan besaran lain, yaitu dosis serap.

Dosis serap secara langsung berkaitan dengan jaringan tubuh. Dosis serap merupakan besaran yang dibatasi oleh jumlah energi yang diserap dari radiasi oleh jaringan tubuh atau energi yang diserahkan oleh radiasi pengion (dE) kepada bahan yang dilaluinya (dm), sehingga didapatkan persamaan (wiryosimin, 1996):

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4)$$

dengan satuan $J \cdot kg^{-1}$ untuk dosis serap atau disebut dengan *gray* (Gy), $1 Gy = 100$ rad. Jika dosis serap dihubungkan dengan waktu maka akan menghasilkan besaran lainnya yaitu laju dosis serap, maka persamaannya adalah

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (5)$$

$$\dot{D} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dm} \right) \quad (6)$$

satuan laju dosis dalam SI adalah joule/kg jam atau gray/jam. Persamaan 6 menyatakan nilai dari rata-rata energi yang diserap dalam organ atau jaringan (Wiryosimin, 1996).

Dalam proteksi radiasi terhadap tubuh manusia, efek radiasi yang ditimbulkan oleh bermacam-macam radiasi terhadap organ tubuh manusia tidak sama walaupun dosisnya sama. Hal ini disebabkan adanya efek biologi yang tergantung pada macam dan kualitas radiasi sehingga perlu besaran lain yaitu dosis ekuivalen yang diberi simbol H (Bapeten, 2015).

$$H = D Q N \quad (7)$$

dengan D adalah dosis serap (Gy), Q adalah faktor bobot dan N adalah faktor modifikasi, misalnya pengaruh laju dosis, distribusi zat radioaktif dalam tubuh. Untuk keperluan proteksi radiasi, nilai N selalu dianggap $N=1$. Dosis ekuivalen memiliki satuan sievert (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rem}$$

Pada peramaan 7 terdapat faktor bobot. Faktor bobot merupakan sebuah nilai yang diaplikasikan untuk membedakan pengaruh berbagai jenis radiasi terhadap suatu organ pada manusia. Faktor bobot radiasi Q dapat disebut juga *Relative Biological Effectiveness* (RBE) yang merupakan rasio dari dosis referensi (sinar X tenaga 250kV) terhadap energi radiasi yang diberikan (*Nuclear Energy Agency*, 2011 ; Wiryosimin, 1996).

Tabel 7. Faktor Bobot Radiasi (*Nuclear Energy Agency*, 2011)

Tipe Radiasi	Faktor Bobot Radiasi
Sinar x dan gamma, semua energi	1
Elektron dan positron, semua energi	1
Neutron dengan energi :	
<10 keV	5
10 keV – 100 keV	10
>100 keV – 2 MeV	20
2 MeV – 20 MeV	10
>20 MeV	5
Proton dengan energi >2 MeV	2-5
Partikel alfa, fragmen fisi dan partikel berat	20

Jaringan tubuh ternyata juga mempunyai kepekaan yang berbeda satu dengan yang lainnya. Maka perlu didefinisikan besaran lain yang diturunkan dari dosis ekuivalen, dengan memberikan bobot pada dosis ekuivalen di setiap organ. Faktor bobot yang digunakan untuk dosis serap di dalam setiap organ T disebut faktor

berat jaringan (w_T). Kemudian nilai dari w_T diberikan seragam di seluruh tubuh sehingga menghasilkan dosis efektif. Jumlah faktor berat jaringan untuk seluruh tubuh sama dengan satu. Dosis ekuivalen yang telah diberi berat, maka dosis efektifnya adalah

$$H_{eff} = H w_t = D Q w_t \quad (8)$$

dengan D adalah dosis serap (Gy), w_T adalah faktor berat organ dan Q adalah faktor berat radiasi (Wiryosimin, 1996).

Tabel 8. Faktor Berat Organ (Wiryosimin, 1996)

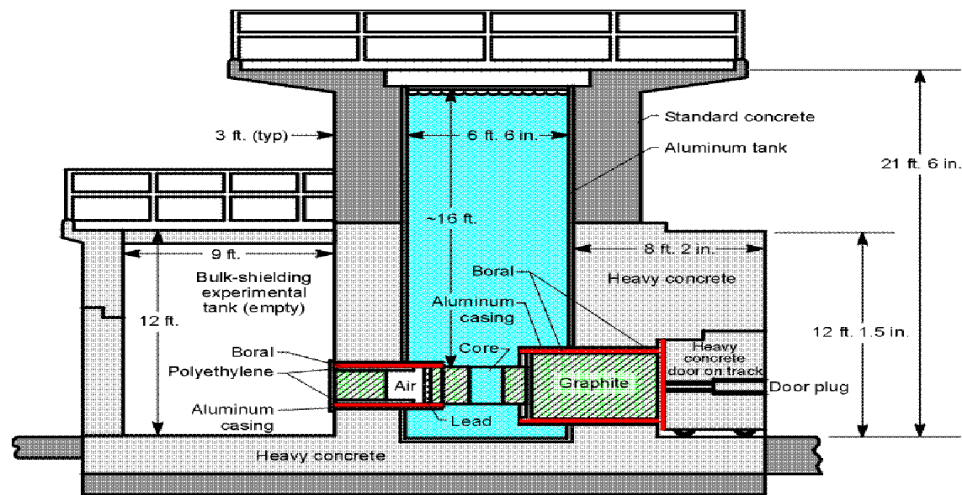
Jenis Jaringan / Organ	Faktor Berat Organ (w_T)
Paru-paru	0.12
Payudara	0.05
Hati	0.05
Kulit	0.01
Permukaan tulang	0.01

5. Reaktor Kartini

Reaktor Kartini yang terletak di Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta adalah salah satu fasilitas yang dimiliki oleh Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-Badan Tenaga Nuklir Nasional (PSTA-BATAN). Mulai dibangun pada tahun 1974 dan pertama kali beroperasi pada tahun 1979, Reaktor Kartini merupakan reaktor riset jenis TRIGA (*Training Research Isotop production/Irradiation General Atomic*) dengan disain sebagai reaktor tipe kolam 250 kW dan daya operasi 100 kW. Reaktor Kartini dimanfaatkan untuk tujuan penelitian, irradiasi, pendidikan dan pelatihan.

a. Teras Reaktor

Teras reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi pembelahan bahan bakar nuklir. Teras reaktor ditempatkan di dalam sumur reaktor yang terbuat dari beton sebagai perisai radiasi. Teras reaktor berbentuk silinder yang terdiri dari kisi-kisi dan terdapat dudukan elemen–elemen bahan bakar dan batang-batang kendali. Teras reaktor dikelilingi oleh grafit yang berfungsi memantulkan neutron (reflektor), susunan teras reflektor ini mempunyai diameter 1,09 m dan tinggi 0,58 m ditempatkan pada suatu dudukan atau bangku reflektor. Teras dan reflektor berada di dalam tangki reaktor yang berisi air. Bagian terbawah dari reflektor berada pada ketinggian 0,61 m dari dasar tangki. Sedangkan ketinggian air dari bagian atas reflektor adalah 4,9 m, berfungsi sebagai pendingin juga sebagai perisai radiasi ke arah vertikal.



Gambar 4. Skema Teras Reaktor TRIGA (Ravnik,1999)

b. Moderator

Moderator merupakan bahan yang mempunyai fungsi sebagai pelambat neutron. Moderator yang dipakai adalah air ringan dan Zirkonium Hidrida (ZrH).

c. Reflektor

Reflektor berupa ring silinder dari grafit yang dipasang menyelubungi teras reaktor yang berada seakan-akan di dalam kaleng alumunium, dimaksudkan untuk menjaga agar tidak ada kontak langsung antara air dengan grafit, berfungsi sebagai reflektor neutron. Pada reflektor ini terdapat lekukan atau sumur berbentuk ring yang digunakan sebagai fasilitas irradiasi dalam teras. Lekukan ini juga dibatasi oleh logam alumunium, dan merupakan satu kesatuan dari reflektor yang dirancang untuk menempatkan perangkat irradiasi rak putar. Reflektor ini mempunyai diameter dalam 45,7 m dengan ketebalan 30,5 cm dan tinggi 55,9 cm. Reflektor ini mempunyai beberapa bagian untuk menempatkan fasilitas irradiasi, yaitu:

- Sebuah lubang melingkar di seluruh permukaan atas reflektor, digunakan untuk penempatan rak putar (*Lazy Suzan*) dengan lebar radial 10,2 cm dan kedalaman 25,5 cm.
- Sebuah lubang menembus reflektor sampai ke permukaan bagian dalam secara radial dari samping digunakan untuk memasang sebuah tabung berukuran diameter 16,8 cm dan tebal 0,71 cm.

d. Tabung Berkas Neutron (*Beamport*)

Pada Reaktor Kartini terdapat 4 *beamport* yaitu: *beamport* arah tangensial (1 buah) dan *beamport* arah radial (3 buah). Beberapa fungsi dari *beamport* yaitu menyediakan berkas neutron dan gamma untuk keperluan eksperimen dan untuk fasilitas irradiasi bahan-bahan berukuran besar.

Tabung saluran berkas neutron mempunyai diameter 19,5 cm dengan arah horizontal menembus perisai beton dan tangki reaktor ke permukaan reflektor. Fasilitas *beamport* ini berguna untuk menyediakan berkas neutron untuk berbagai eksperimen dan untuk fasilitas radiasi neutron bahan yang relatif besar (berdiameter 15,2 cm).

Terdapat dua buah *beamport* dengan arah radial terhadap teras *beamport* yang tembus arah radial hingga ke teras reaktor dan *beamport* yang terpasang secara tangensial.

e. Kisi Reflektor

Lempeng kisi reaktor bagian atas terbuat dari aluminium berdiameter 49,5 cm dan tebal 19 mm, jarak lubang-lubang kisi dibuat sedemikian presisinya untuk digunakan sebagai lubang tempat bahan bakar.

f. Batang Kendali

Batang kendali digunakan untuk mengoperasikan reaktor atau *start-up*, mengatur tingkat daya reaktor dan mematikan reaktor. Ujung atas dari batang kendali ini dihubungkan dengan alat penggerak atau motor batang kendali di atas tangki reaktor.

g. Tangki Reaktor

Terbuat dari aluminium tebal 6 mm, diameter 2 m. Tangki digunakan sebagai pemisah antara air (sebagai pelambat neutron dan pendingin reaktor) dengan beton perisai radiasi. Pada tangki ini diletakkan teras reaktor beserta perlengkapannya.

h. Kolom Termal

Pada Reaktor Kartini terdapat dua kolom termal yang berisi grafit. Fungsi dari kolom termal ini adalah untuk eksperimen irradiasi dari sampel yang khusus memerlukan radiasi neutron termal, contohnya BNCT.

Kolom termal terbuat dari grafit yang berukuran 1,20 m x 1,20 m x 1,60 m memanjang dari sisi luar reflektor ke permukaan sebelah dalam pintu tertutup. Pintu penutup ini terbuat dari beton berat dan untuk membuka atau menutup digunakan motor penggerak yang berjalan di atas rel. Ukuran sampel yang dapat diirradiasi maksimum 10 cm x 10 cm.

i. Bahan Bakar

Reaktor Kartini menggunakan bahan bakar TRIGA, U-ZrH tipe 104 dan tipe 204 buatan *General Atomic*. Elemen bahan bakar merupakan campuran homogen bahan bakar uranium dan moderator *zirkonium hibrida* (U-ZrH), berbentuk padat dan setiap elemen rata-rata mengandung Uranium ^{235}U 8% berat dengan pengkayaan 20%. Di dalam bahan bakar normal terkandung 36-38 gram ^{235}U , dengan berat total 3 kg untuk setiap elemen. Di samping itu, Reaktor Kartini mempunyai elemen bahan bakar tiruan (*dummy*) yang bentuk dan ukuran sama dengan elemen bahan bakar dan tersusun dari grafit. Fungsi dari elemen bahan tiruan ini adalah untuk menaikkan efisiensi neutron dalam teras (berfungsi sebagai reflektor).

j. Rak Putar (*Lazy Suzan*)

Fasilitas irradiasi Lazy Suzan adalah sebuah fasilitas irradiasi yang mengelilingi teras reaktor, terletak di bagian luar reflektor. Fasilitas ini

mempunyai 40 lubang tempat radiasi, dapat digunakan secara bersama-sama dan dapat diputar. Tiap lubang (tabung) mempunyai ukuran diameter dalam 55,8 cm dan diameter luar 70 cm. Tiap lubang dalam rak putar dapat diisi sampai 2 kontainer (ditumpuk). Sampel yang akan diirradiasi akan dimasukkan dalam satu ampul. Pemasukan dan pengeluaran ampul pada fasilitas ini dilakukan melalui sebuah tabung pengarah yang dapat diatur dari atas reaktor. Sampel yang diirradiasi dimasukkan ke dalam kontainer, berukuran panjang 13,6 cm dan diameter luar 2,84 cm. Masing-masing lubang dalam fasilitas ini dapat diisi sampel dua tabung ampul. Fasilitas ini biasanya digunakan untuk mengirradiasi sampel yang mempunyai umur panjang.

k. *Pneumatic Transfer Sistem*

Sistem *transfer pneumatic* digunakan untuk eksperimen irradiasi sampel yang menghasilkan radionuklida berumur pendek. Sampel yang akan diirradiasi dapat dimasukkan maupun diambil dari teras reaktor secara otomatis dalam waktu yang singkat.

l. Saluran Tengah

Saluran tengah didesain untuk keperluan eksperimen irradiasi di daerah yang mempunyai fluks neutron maksimum. Saluran tengah ini berupa tabung yang berdiameter 2,4 cm dan panjang 600 cm. Tabung ini terletak di tengah-tengah tangki reaktor dan memanjang dari atas sampai ke penyangga teras. Di dasar tabung terdapat 4 buah lubang yang berguna untuk jalan masuk air ke dalam tabung selama reaktor beroperasi. Lubang memiliki ukuran berdiameter 1,8 cm dan panjang 5,6 cm.

B. Penelitian yang Relevan

Irhas (2014) dalam penelitiannya yang berjudul “*Dosimetri Boron Neutron Capture Therapy pada Kanker Hati (Hepatocellular Carcinoma) Menggunakan MCNP-code dengan Sumber Neutron dari Kolom Termal Reaktor Kartini*”, menggunakan tujuh variasi konsentrasi Boron (20; 25; 30; 35; 40; 45; 47) $\mu\text{g/g}$. Hasil dosis dari masing-masing variasi konsentrasi Boron adalah (0,059; 0,072; 0,084; 0,098; 0,108; 0,12; 0,0125) Gy/detik. Waktu yang dibutuhkan untuk mengiradiasi dalam masing-masing konsentrasi adalah 14 menit 1 detik; 11 menit 36 detik; 09 menit 53 detik; 8 menit 30 detik; 7 menit 41 detik; 6 menit 54 detik; 6 menit 38 detik. Waktu iradiasi jaringan lebih pendek saat menggunakan konsentrasi Boron yang semakin besar, yaitu pada konsentrasi 47 $\mu\text{g/g}$.

C. Kerangka Berpikir

Berdasarkan hasil uraian di atas, akan dilakukan penelitian untuk simulasi terapi BNCT pada jaringan payudara yang terdapat *Invasive Lobular Carcinoma* pada payudara wanita dengan menggunakan sumber neutron dari kolom termal pada Reaktor Kartini. Senyawa Boron yang akan diinfusi ke tubuh pasien adalah *Boron Phenylalanine* (BPA) dengan cara *intra vena*. Teknik *intra vena* yaitu misalnya pada kasus ini payudara seorang pasien wanita yang memiliki *Invasive Lobular Carcinoma* akan diinfus dengan BPA atau BSH melalui pembuluh darah vena. Selanjutnya dilakukan proses terapi BNCT dengan cara pasien yang sudah diinjeksi dengan BPA ditunggu 90 menit kemudian payudara diiradiasi dengan neutron di Reaktor Kartini dalam waktu yang akan ditentukan dalam penelitian ini sehingga dosis yang akan diterima jaringan kanker cukup.

BAB III METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Pembuatan program simulasi ini dilaksanakan pada bulan September 2014 sampai dengan September 2016, dengan hasil berupa dosis serap boron terhadap BNCT untuk kanker payudara menggunakan desain kolimator dengan sumber reaktor Kartini pada kolom termal. Pembuatan program simulasi ini dilakukan di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Bidang Tenaga Nuklir Nasional (PSTA – BATAN) yang beralamat di Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKBB Yogyakarta.

B. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan untuk membuat simulasi ini adalah :

1. Perangkat Keras

Satu unit Komputer Portable ASUS® seri X202E ASUS Notebook Series dengan spesifikasi:

- a. Prosesor Intel(R) core(MT) i3-3217U CPU @1,80GHz
- b. Memori terinstal (RAM) 4,00GB (3,89 GB dapat digunakan)
- c. Jenis Sistem Operasi windows 8 single Language 64-bit, prosesor berbasis x64
- d. ID Produk 00179-40226-45740-AAOEM

2. Perangkat Lunak

- a. Monte Carlo N-Particle eXtendend™ (MCNPX)
- b. Visual Editor (Vised)
- c. Notepad

d. Microsoft Excel[®] 2010

3. Data Material dan Dimensi Geometri *Breast Cancer*

- a. Setengah bola kulit payudara dimensi $(0,5 \times \frac{4}{3} \pi \times 7,25^3) \text{ cm}^3$
- b. Setengah bola payudara dimensi $(0,5 \times \frac{4}{3} \pi \times 7^3) \text{ cm}^3$
- c. Balok tubuh dimensi $(16 \times 16 \times 4) \text{ cm}^3$
- d. Bola GTV dimensi $(\frac{4}{3} \pi \times 1,5^3) \text{ cm}^3$
- e. Bola CTV dimensi $(\frac{4}{3} \pi \times 2^3) \text{ cm}^3$
- f. Bola PTV dimensi $(\frac{4}{3} \pi \times 2,5^3) \text{ cm}^3$

C. Variabel Penelitian

Dalam simulasi ini variabel yang digunakan adalah:

a. Variabel Bebas

Massa boron yang dimasukkan dalam jaringan kanker dengan variasi massa sebagai berikut :

20 $\mu\text{gram/gram}$ kanker, 25 $\mu\text{gram/gram}$ kanker, 30 $\mu\text{gram/gram}$ kanker, 35 $\mu\text{gram/gram}$ kanker, 40 $\mu\text{gram/gram}$ kanker, 45 $\mu\text{gram/gram}$ kanker

b. Variabel Terikat

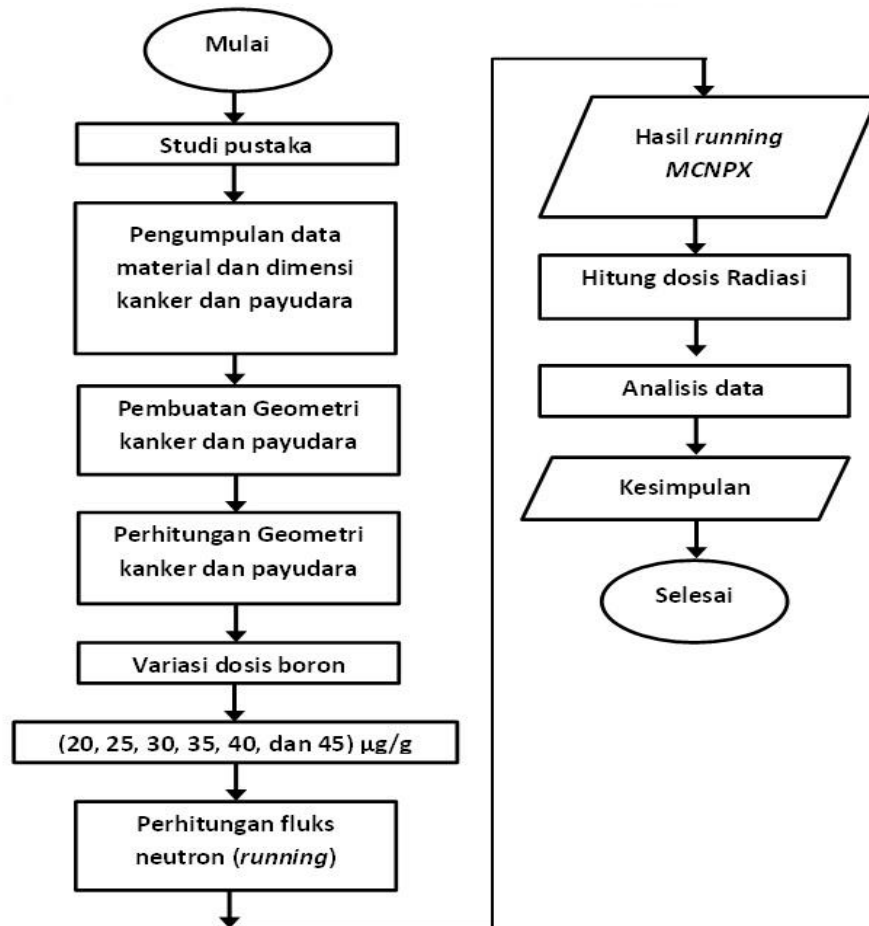
Nilai fluks neutron dan dosis hamburan neutron yang diterima jaringan payudara dan jaringan kanker.

c. Variabel Kontrol

Fluks neutron dan laju dosis gamma dari sumber keluaran kolom termal Reaktor Kartini.

D. Alur Penelitian

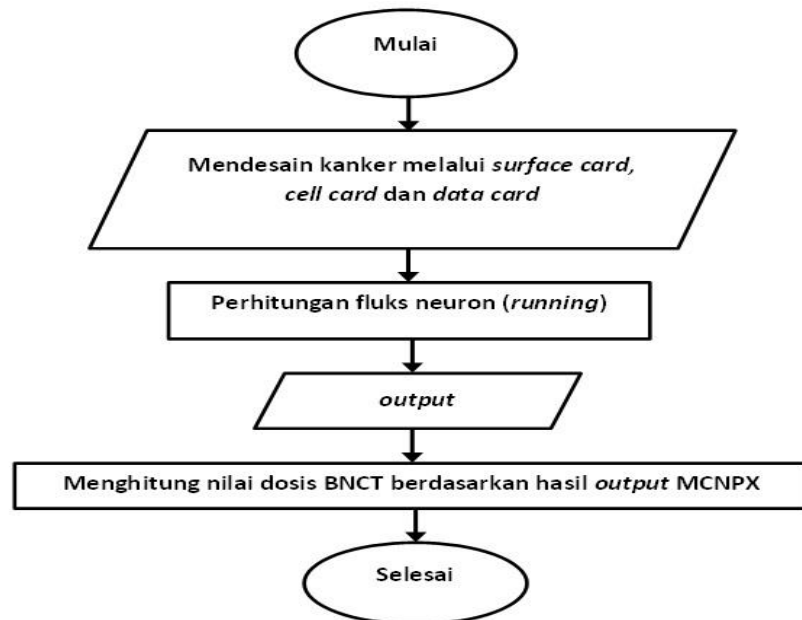
Prosedur pelaksanaan penelitian dirumuskan dalam satu diagram alir (*flow chart*) yang ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Digram Alir Penelitian

E. Algoritma MCNPX

Algoritma komputasi menggunakan MCNPX dapat ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Algoritma MCNPX pada perhitungan fluks neutron

1. *Input* MCNPX

Data masukan atau *input* dilakukan pada *notepad* dan kemudian disimpan dengan ekstensi ****.i*. pada inputan *notepad* berisi *cell card*, *surface card*, dan *data card* yang masing-masing dibatasi oleh *blank delimiter*. Berikut adalah penjelasan dari masing-masing inputan :

a. *Cell card*

Cell card adalah bagian yang membuat unit volume yang telah dirangkai dari *surface card* dan diisi oleh material dari *data card* (Muslih, 2015). Tabel 9 adalah tabel berbagai jenis *input cell card* :

Tabel 9. Jenis *Input Cell Card* (Harmon *et.al*, 1994)

Parameter <i>Input</i>	Deskripsi
<i>J</i>	Nomor <i>cell</i> $1 \leq j \leq 99999$
<i>M</i>	Nomor <i>material</i> Jika $m > 0$, maka <i>cell</i> berisi material m Jika $m < 0$, maka <i>cell</i> dianggap ruang hampa
<i>D</i>	Densitas <i>material</i> Jika $d > 0$, maka yang dimaksud adalah densitas atom dengan satuan $10^{24} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-3}$ Jika $d < 0$, maka yang dimaksud adalah densitas massa dengan satuan $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
<i>Geom</i>	Spesifikasi geometri <i>cell</i>
<i>Parameter</i>	Spesifikasi opsional dari parameter <i>cell</i>

b. *Surface card*

Surface card adalah batas geometri standar yang merupakan bentuk dari persamaan matematika. Sebagai contoh : satu bidang datar (*plane*) adalah bentuk lain dari persamaan linier, sedangkan bidang garis silinder adalah bentuk lain dari persamaan matematika untuk lingkaran. Tabel 10 adalah tabel dari *Surface Card* (Muslih, 2015).

Tabel 10. MCNPX *Surface Card* (Booth *et.al*, 2003)

Lamb -ang	Tipe	Penjelasan	Persamaan	Input
P	Plat	Umum	$Ax + By + Cz - D = 0$	ABCD
PX		Tegak lurus sb.X	$x - D = 0$	D
PY		Tegak lurus sb.Y	$y - D = 0$	D
PZ		Tegak lurus Sb.Z	$z - D = 0$	D
SO	Bola	Titik Pusat di 0,0,0	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S		Titik pusat di x,y,z	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z} R$
C/Y	Silin- der	Paralel sumbu Y	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{y}\bar{z}R$
CY		Pada sumbu Y	$x^2 - z^2 - R^2 = 0$	R
K/Y	Cone	Paralel sumbu Y	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x}\bar{y}\bar{z}t^2$ ± 1

c. *Data card*

Data card berisi informasi material bahan yang terkait unit volume, biasanya berupa unsur penyusun unit volume, sumber radiasi, data titik interpolasi untuk dosis radiasi, mode pengukuran, energi dan jumlah iterasi yang ingin dilakukan terkait dengan kebutuhan akurasi. MCNPX mendefinisikan unsur kimia yang disebut dengan *zaid*. *ZAid* adalah suatu identitas (*id*) unsur yang mewakili nomor atom (*Z*) dan nomor massa (*A*). Suatu material dapat tersusun lebih dari satu unsur, maka penulisan *ZAid* diikuti fraksi atom atau massa dalam senyawa atau campuran tersebut (Muslih, 2015).

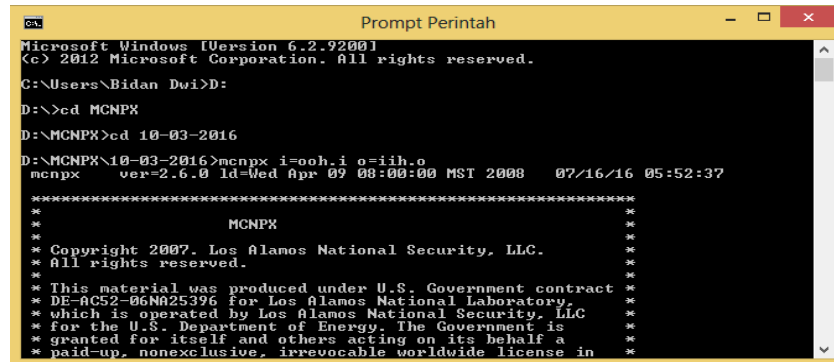
Di dalam *data card* juga terdapat *input* untuk melakukan pengukuran neutron dan gamma. Metode pengukuran (*tally*) dalam MCNPX secara lengkap dijelaskan dalam Tabel 11.

Tabel 11. Kode *Tally* pada MCNPX (Muslih, 2015)

<i>Tally</i>	Metode Partikel	Deskripsi	Units	Modifikasi <i>tally</i>	Units
F1	:N, :P, :E	Arus permukaan	#	*F1	MeV
F2	:N, :P, :E	Fluks permukaan	#/cm ²	*F2	MeV/cm ²
F4	:N, :P, :E	Fluks rerata yang melewati <i>cell</i>	#/cm ²	*F4	MeV/cm ²
F5	:N, :P	Fluks dari sumber titik atau cincin detektor	#/cm ²	*F5	MeV/cm ²
F6	:N, :P, :N,P	Panjang lintasan yang diperkirakan berdasarkan energi deposisi	MeV/g	*F6	Jerks/g
F7	:N	Panjang lintasan yang diperkirakan berdasarkan deposisi energi fisi	MeV/g	*F7	Jerks/g
F8	:N, :P, :E, :P,E	Pulsa <i>tally</i> tinggi	Pulsa	*F8 +F8	MeV Muatan

2. Running MCNPX

Source code MCNPX disimpan dalam *notepad* dengan format file **.i*. Running file **.i* dieksekusi melalui *command prompt* (cmd) dengan cara memanggil *directory file source code* tersimpan. Contoh proses *running* ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses Running MCNPX

3. Output MCNPX

Output MCNPX secara otomatis tersimpan satu folder dengan file input. Format file dalam bentuk ekstensi **.o* dan dapat dibuka melalui *notepad*. Output berisi data hasil perhitungan. Contoh *file output* ditampilkan pada Gambar 8.

```
tally type 2      particle flux averaged over a surface.
particle(s): neutron

this tally is all multiplied by 1.00000E+14

areas
  surface:      5      6      7      12      13
             3.08000E+02 1.00400E+03 1.00400E+03 7.90000E+01 2.80000E+01
             21      22      23      24      25
             4.05000E+01 5.89000E+01 5.89000E+01 7.48000E+01 9.03000E+01
             28      29      30      31      32
             1.25500E+02 1.34800E+02 1.41500E+02 1.47000E+02 1.50900E+02
             35      36      37      38      39
             1.53100E+02 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03
             42      43      44      45      46
             1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03
             49      50      51      52      53
             1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03 1.00400E+03

surface 5
energy
5.0000E-07 7.43126E+09 0.0146
1.0000E-02 3.23400E+11 0.0030
2.0000E+01 0.00000E+00 0.0000
total      3.30831E+11 0.0029
```

Gambar 8. File Output MCNPX

F. Metode Perhitungan Dosis Radiasi

Perhitungan dosis dari BNCT disesuaikan dengan interaksi yang terjadi. Perhitungannya yaitu menghitung dosis alfa, dosis proton, dosis hamburan neutron dan dosis gamma dari reaktor dan interaksi dengan materi. Penentuan nilai laju dosis gamma dari reaktor dan dosis hamburan neutron dapat digunakan langsung dari keluaran MCNP yang kemudian dilanjutkan perhitungan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel*.

1. Perhitungan jumlah atom dalam jaringan

Perhitungan jumlah atom dalam jaringan dapat dicari dengan persamaan berikut (Berlianti, 2013) :

$$N_{i-jaringan} = \frac{N_i(atom)}{m_{jaringan}(kg)} \quad (9)$$

dengan $N_{i-jaringan}$ adalah jumlah atom dalam jaringan, N_i adalah jumlah atom tiap unsur dalam jaringan dan $m_{jaringan}$ adalah massa suatu jaringan dengan satuan kg.

Kemudian mencari jumlah atom dengan mengalikan nilai mol suatu unsur (n_i) dengan bilangan Avogadro ($N_A = 6,023 \times 10^{23} atom/mol$). Persamaannya adalah sebagai berikut (Berlianti, 2013) :

$$N_i = n_i N_A \quad (10)$$

$$n_i = \frac{m_i(gram)}{Ar_i(\frac{gram}{mol})} \quad (11)$$

Bila massa suatu unsur (m_i) dibagi dengan massa atom relatif (Ar) suatu unsur, maka akan menghasilkan nilai mol suatu unsur (persamaan 11) (Berlianti, 2013).

2. Perhitungan laju dosis

Laju dosis yang akan dihitung dalam penelitian ini adalah laju dosis total yang terdiri atas jumlah keseluruhan dari faktor kualitas radiasi dari suatu sumber (w) yang dikalikan dengan laju dosis dari suatu sumber (\dot{D}). Sumber radiasinya yaitu, alfa, proton, neutron dan gamma, sehingga persamaan laju dosis total adalah (Berlianti, 2013) :

$$\dot{D}_{total} = (w_{alfa} \dot{D}_{alfa}) + (w_p \dot{D}_p) + (w_{neutron} \dot{D}_{neutron}) + (w_\gamma \dot{D}_\gamma) \quad (12)$$

Untuk memperoleh laju dosis dari setiap sumber maka akan dijelaskan sebagai berikut :

a. Dosis alfa

Laju dosis alfa merupakan hasil interaksi antara boron dengan neutron termal. Reaksi tersebut menghasilkan alfa dengan energi rerata (Q) 2,33 MeV pada Gambar 2. Berikut merupakan persamaan dari perhitungan laju dosis untuk alfa (Cember, *et.al*, 2009).

$$\dot{D}_{alfa} = \frac{\Phi N_{B10-jaringan} \sigma_{a,B10} Q (1,6 \times 10^{-13}) J/MeV}{1 \frac{J/kg}{Gy}} \quad (13)$$

dengan \dot{D}_{alfa} adalah laju dosis alfa (Gy/detik). Φ adalah fluks neutron termal (neutron/cm².detik). $N_{B10-jaringan}$ adalah jumlah atom boron per kg jaringan (atom/kg jaringan). $\sigma_{a,B10}$ adalahampang lintang mikroskopik serapan boron 10 (cm²). Q adalah energi partikel (MeV).

b. Dosis proton

Laju dosis proton merupakan hasil interaksi tangkapan antara neutron dengan nitrogen-14. Reaksi tersebut menghasilkan carbon-14 dan proton dengan energi

rerata (Q) 0,66 MeV pada persamaan 2. Berikut merupakan persamaan dari perhitungan laju dosis untuk proton (Cember, et.al, 2009)

$$\dot{D}_{proton} = \frac{\Phi N_{N-jaringan} \sigma_{a,N} Q (1,6 \times 10^{-13}) J/MeV}{1 \frac{J/kg}{Gy}} \quad (14)$$

dengan \dot{D}_{proton} adalah laju dosis proton (Gy/detik). Φ adalah fluk neutron termal (neutron/cm².detik). $N_{N-jaringan}$ adalah jumlah atom nitrogen per kg jaringan (atom/kg jaringan). $\sigma_{a,B10}$ adalah tampang lintang mikroskopik serapan nitrogen (cm²). Q adalah energi partikel (MeV).

c. Dosis gamma

Hidrogen di dalam jaringan akan berinteraksi tangkapan dengan neutron termal. Laju reaksi tangkapan neutron termal oleh hidrogen ini sebanding dengan laju pembentukan hidrogen-2. Laju pembentukan hidrogen-2 ini setara dengan laju pelepasan gamma dengan energi 2,23 MeV. Hidrogen-2 ini merupakan atom tereksitasi (Berlianti, 2013).

$$\ddot{R} = \Phi N_{H-jaringan} \sigma_H \quad (15)$$

\ddot{R} merupakan laju pembentukan hidrogen-2 atau laju pelepasan gamma (foton/kg . detik = Bq/Kg). Φ merupakan fluks neutron termal (n/cm² .detik). $N_{H-jaringan}$ merupakan jumlah atom Hidrogen/kg jaringan (atom/kg). σ_H tampang lintang mikroskopik serapan Hidrogen (cm²).

Laju Dosis gamma dari reaksi Hidrogen adalah sebagai berikut :

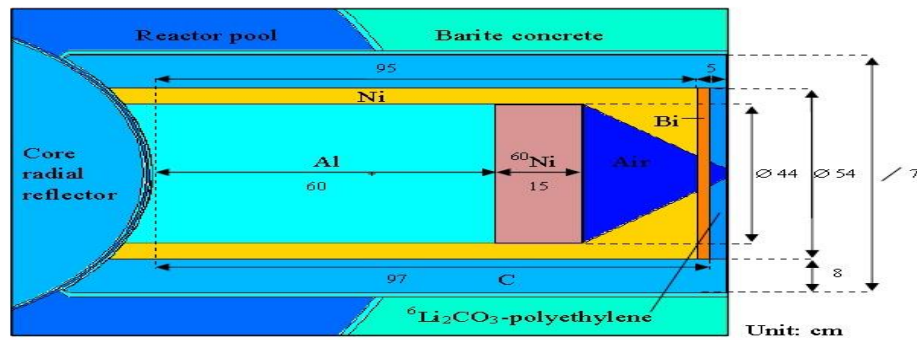
$$\dot{D}_\gamma = \ddot{R} \Delta \varphi \quad (16)$$

dengan Δ adalah koefisien laju dosis serap atau aktivitas spesifik CGS ke SI ($1,6 \times 10^{-13} \times 2,33 \text{ MeV}/\gamma = 3,568 \times 10^{-13} \frac{Gy/detik}{Bq/kg}$). φ adalah fraksi dosis serap gamma.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan sumber neutron dari keluaran kolimator khusus BNCT. Kolimasi neutron berasal dari Reaktor Kartini yang keluar melewati kolom termal. Desain kolimator dibuat oleh Fauziah (2013) yang disajikan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Model Kolimator Kolom Termal reaktor Kartini (Fauziah, 2013)

Tabel 12. Keluaran kolimator kolom termal (Fauziah, 2013)

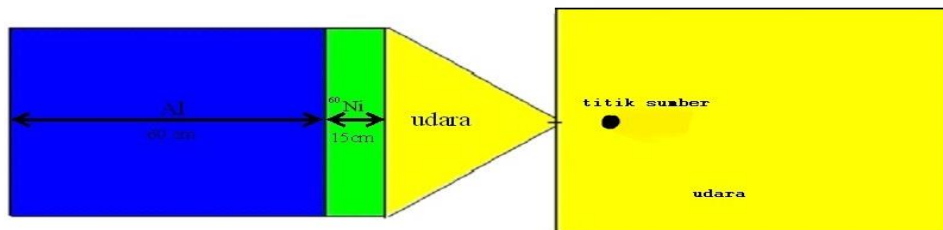
Parameter	Nilai
$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$7,65 \times 10^8$
$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$1,16 \times 10^{-13}$
ϕ_{th}/ϕ_{epi}	0,007

Alasan mengapa pada penelitian ini menggunakan kolom termal yaitu karena keluaran neutronnya sudah memenuhi rekomendasi IAEA. Parameter kolimator yang sesuai dapat dilihat di Tabel 5, sedangkan untuk kolimator yang dirancang oleh Fauziah (2013) dapat dilihat di Tabel 12, dan lebih lengkapnya di Tabel 4.

Kolimator tersebut merupakan hasil dari simulasi dengan MCNP5, namun dalam penelitian ini simulasi menggunakan MCNPX. Karena model kolimator di atas tidak mampu disimulasikan di MCNPX, maka peneliti membuat kolimator baru dengan titik sumber memiliki hasil yang mendekati hasil sebelumnya. Hasil dari kolimator dengan titik sumber dapat dilihat pada Tabel 13 dan kolimator yang dibuat dengan MCNPX dapat dilihat di Gambar 10.

Tabel 13. Keluaran kolimator dengan titik sumber

Parameter	Nilai
$\phi_{epi}(n.cm^{-2}.s^{-1})$	$8,59 \times 10^8$
$\bar{D}_\gamma / \phi_{epi}(Gy.cm^2.n^{-1})$	$8,35195 \times 10^{-16}$
ϕ_{th}/ϕ_{epi}	0,007

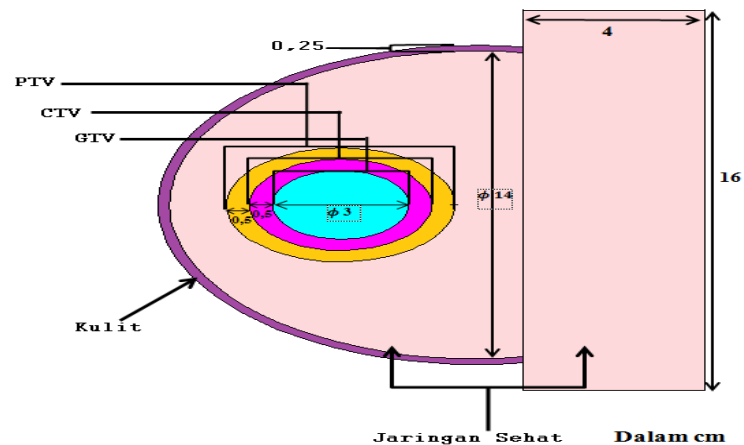


Gambar 10. Model kolimator dengan titik sumber di (0,2,0)

Gambar 10 merupakan model kolimator dengan titik sumber di (0,2,0), warna biru menunjukkan dinding kolimator yang terbuat dari aluminium berdiameter 22 cm dan tingginya 60 cm. Warna hijau merupakan nikel-60 berdiameter 22 cm dengan tinggi 15 cm, berfungsi sebagai pereduksi neutron yang energinya keluar dari rentang energi untuk BNCT. Sedangkan warna kuning menunjukkan ujung kolimator berbentuk kerucut dan kolom termal sebagai detektor dan tempat

penyinaran. Penyesuaian dilakukan dengan menyamakan fluks neutron yang keluar dari keluaran kolimator kolom termal hasil penelitian Fauziah (2013).

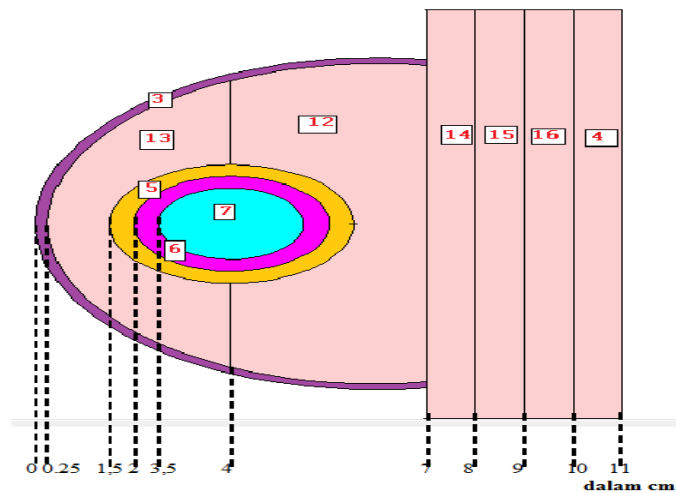
Organ payudara diletakkan dalam kolom termal dengan jarak antara dinding kolimator dengan organ adalah 3 cm dan dari sumber sekitar 1 cm. Simulasi organ payudara dibagi menjadi 3 bagian, yaitu pada bagian luar berupa kulit yang disimulasikan dengan bentuk geometri berdiameter 7,25 cm. Bagian kedua berupa jaringan sehat dengan bentuk geometri setengah bola berdiameter 7 cm untuk jaringan payudara dan balok berukuran 16 cm x 16 cm x 4 cm untuk jaringan di belakang payudara sebelum paru-paru atau setengah bagian dada. Bagian ketiga adalah jaringan kanker. Di sini peneliti membagi bagian kanker menjadi 3 bagian, yaitu *Planning Kanker Volume* (PTV), *Clinical Kanker Volume* (CTV), dan *Gross Kanker Volume* (GTV). PTV memiliki material sama dengan jaringan sehat. CTV memiliki karakteristik hampir sama dengan kanker, dikarenakan masih ada infiltrasi kanker dari daerah kanker. Massa jenis CTV memiliki nilai sama dengan kanker, namun untuk sebaran boron memiliki perbedaan di antara jaringan sehat dan kanker. GTV atau bisa disebut dengan jaringan kanker, merupakan bagian yang memiliki karakteristik yang sesuai perencanaan di antaranya jumlah boron dan densitasnya. Stadium kanker yang digunakan adalah 2A di mana kanker memiliki ukuran 3-5 cm dan belum bermetastasis, sehingga boron dapat benar-benar terkonsentrasi di dalamnya. Dalam hal ini jumlah boron yang terkonsentrasi pada bagian tertentu mempengaruhi dosis yang akan diterima. Gambar 11 merupakan pemodelan payudara dan jaringan kanker dengan pendekatan seperti yang dijelaskan sebelumnya.



Gambar 11. Pemodelan payudara dan jaringan kanker dilihat dari samping

Agar diperoleh distribusi fluks neutron dari setiap jaringan maka dilakukan pemotongan-pemotongan sesuai dengan kedalaman jaringan seperti pada Gambar 12. Hasil fluks neutron berdasarkan kedalaman jaringan dapat dilihat pada Tabel 14.

Pada penelitian ini, digunakan variasi konsentrasi boron sebesar 20 $\mu\text{gram/gram}$ kanker sampai 45 $\mu\text{gram/gram}$ kanker. Batas maksimal pemberian konsentrasi boron menurut BPPOM untuk tubuh kita adalah 2-3 mg / hari. Namun dalam BNCT batas maksimal pemberian boron hanya sampai 150 $\mu\text{gram / gram}$ kanker. Hal ini disebabkan karena dalam tubuh kita sudah terdapat boron dan asupan makanan kita sehari-hari kemungkinan mengandung boron yang kita tidak tahu berapa besar kandungan boron di dalamnya. Kandungan boron yang terkandung dalam organ tubuh kita yaitu: kandungan boron dalam hati sebanyak 2,3 ppm (mg/kg), limpa sebanyak 2,6 ppm, sedangkan pada jantung cukup tinggi yaitu 28 ppm (mg/kg) (Yuswanto, 2015).

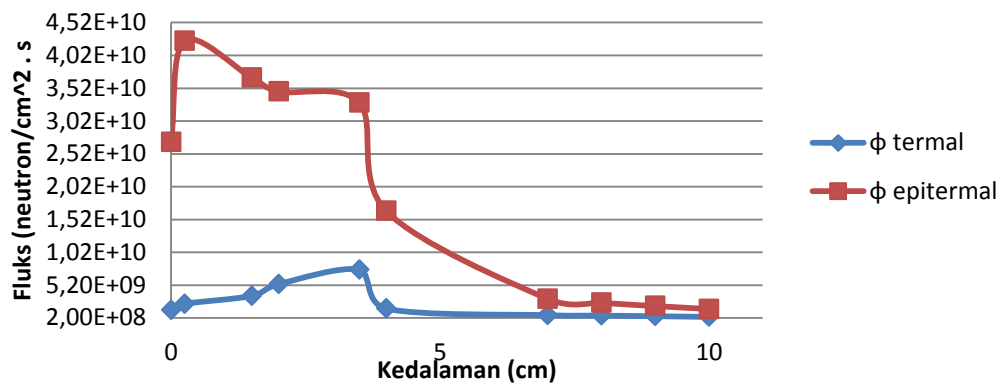


Gambar 12. Model potongan payudara dilihat dari samping

Tabel 14. Fluks neutron dengan dosis boron 45μgram/gram kanker

Jaringan	Cell	Kedalaman	φ termal	φ epitermal
kulit	0	0	1,42E+09	2,70E+10
jaringan sehat	13	0,25	2,35E+09	4,24E+10
ptv	5	1,5	3,55E+09	3,68E+10
ctv	6	2	5,35E+09	3,47E+10
gtv	7	3,5	7,55E+09	3,30E+10
jaringan sehat	12	4	1,63E+09	1,65E+10
jaringan sehat	14	7	6,17E+08	3,12E+09
jaringan sehat	15	8	5,50E+08	2,50E+09
jaringan sehat	16	9	4,64E+08	2,01E+09
jaringan sehat	4	10	3,53E+08	1,56E+09

Tabel 14 merupakan tabel nilai fluks dengan dosis boron 45μgram/gram kanker. Sedangkan untuk dosis kanker lainnya memiliki nilai dan karakteristik hampir sama. Karakteristik nilai fluks yang diterima oleh tiap jaringan yang berhubungan dengan kedalaman jaringan dari titik penyinaran ditunjukkan pada Gambar 13. Diasumsikan bahwa kedalaman dimulai dari nol.



Gambar 13. Distribusi fluks neutron dalam payudara

Dilihat dari Gambar 13, fluks neutron epitermal mengalami kenaikan pada kedalaman antara kulit dan jaringan sehat. Hal ini dikarenakan oleh adanya *fast neutron* dengan intensitas kecil yang keluar dari kolimator. Sedangkan fluks neutron termal memiliki puncak pada kedalaman 3,5 cm, yaitu pada area GTV atau pada kanker. Hal ini sudah sesuai dengan apa yang diharapkan, sehingga fluks dapat digunakan untuk mencari laju dosis boron yang dibutuhkan oleh BNCT.

Pada perhitungan dosis BNCT terdapat empat komponen dosis, yaitu dosis hamburan neutron, dosis gamma, dosis recoil proton, dan dosis interaksi antara boron dengan neutron. Dari semua dosis, fluks termal merupakan yang paling berpengaruh di dalamnya.

Komponen dosis tersebut memiliki faktor bobot yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut terletak pada komponen dosis yang dipengaruhi oleh sensitivitas jaringan target dan *Linear Energy Transfer* (LET) dari masing-masing

dosis. Faktor bobot radiasi ini juga berpengaruh pada kemampuan merusak dari komponen dosis terhadap jaringan target dan dosis serap dari jaringan target.

Laju dosis untuk setiap dosis memiliki kecenderungan meningkat jika konsentrasi boron yang ditingkatkan. Pada perhitungan laju dosis, selain fluks termal yang digunakan, nilai jumlah atom juga digunakan. Nilai jumlah atom dipengaruhi oleh banyaknya massa unsur yang berinteraksi dengan neutron termal. Massa unsur tersebut yaitu, boron-10 yang massanya dapat berubah, nitrogen dan hidrogen yang massanya cenderung tetap.

Pada penelitian ini, boron terkonsentrasi di GTV dengan porsi 90%, sedangkan jaringan lainnya hanya 2,5% saja. Sehingga didapat laju dosis dari 4 komponen dengan konsentrasi boron 20 - 45 µgram/gram kanker yang dapat dilihat pada Lampiran 4. Untuk perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 3.

Pada metode pengobatan BNCT, dosis digunakan secara fraksi tunggal, yaitu pemberian dosis secara langsung dalam satu kali iradiasi sehingga perlu diperhatikan laju dosis total yang diterima oleh jaringan tubuh (Setiyadi, 2015). Dalam penentuan laju dosis yang diserap oleh tubuh aman atau tidak maka digunakan besaran dosis serap total (Berlianti, 2013):

$$dosis\ serap\ total = Laju\ dosis\ (Gy/detik) \times waktu\ iradiasi\ (detik) \quad (17)$$

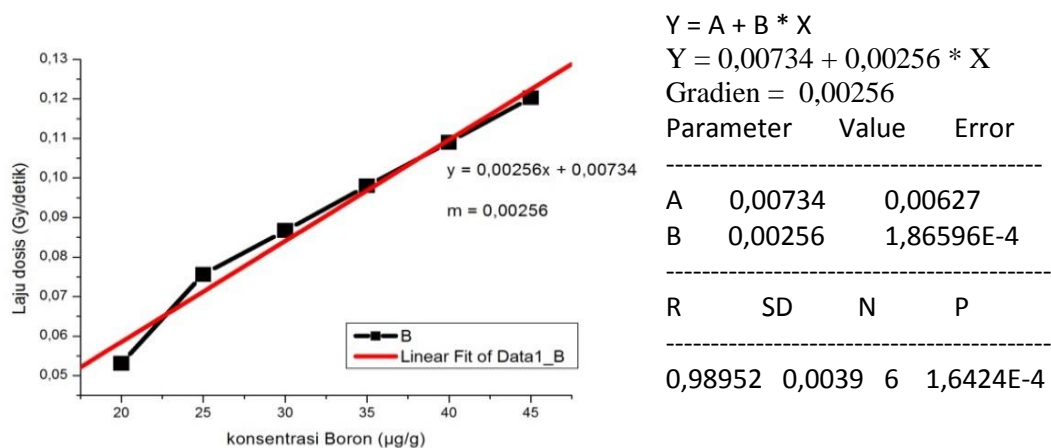
$$waktu\ iradiasi = \frac{Dosis\ minimum\ perusak\ jaringan\ kanker}{laju\ dosis\ total} \quad (18)$$

Batas dosis minimal yang dapat membunuh sel kanker adalah 50 – 55 Gy (Irhas, 2014), sehingga dapat dilihat laju dosis total jaringan pada kanker payudara dengan waktu irdiasinya. Konsentrasi boron-10 yang dibutuhkan umumnya diperkirakan 10^9 atom dengan kelimpahan alami 19,9% per sel, yang

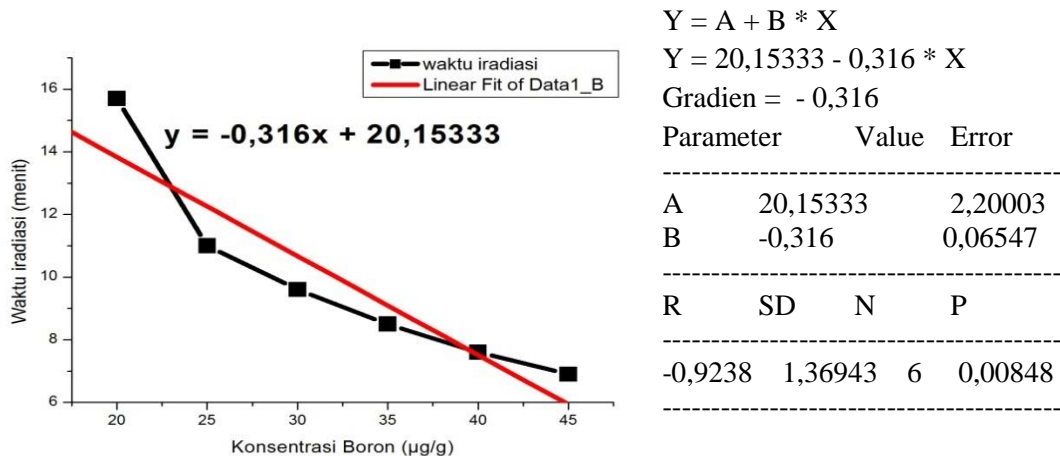
diterjemahkan menjadi sekitar 35 µg per gram jaringan, sehingga pada penelitian ini konsentrasi boron-10 yang digunakan adalah 20 µg - 45 µg per gram jaringan (Zhu *et.al*, 2010).

Tabel 15. Laju dosis dan waktu iradiasi pada jaringan kanker

Konsentrasi boron (µgram/gram kanker)	Laju dosis total (Gy / detik)	Waktu iradiasi untuk 50 Gy (detik)	Waktu iradiasi untuk 50 Gy (Menit)
20	0,0531	941,16	15,7
25	0,0756	661,75	11,0
30	0,0867	576,82	9,6
35	0,0980	510,44	8,5
40	0,1090	458,67	7,6
45	0,1203	415,60	6,9



Gambar 14. Hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis

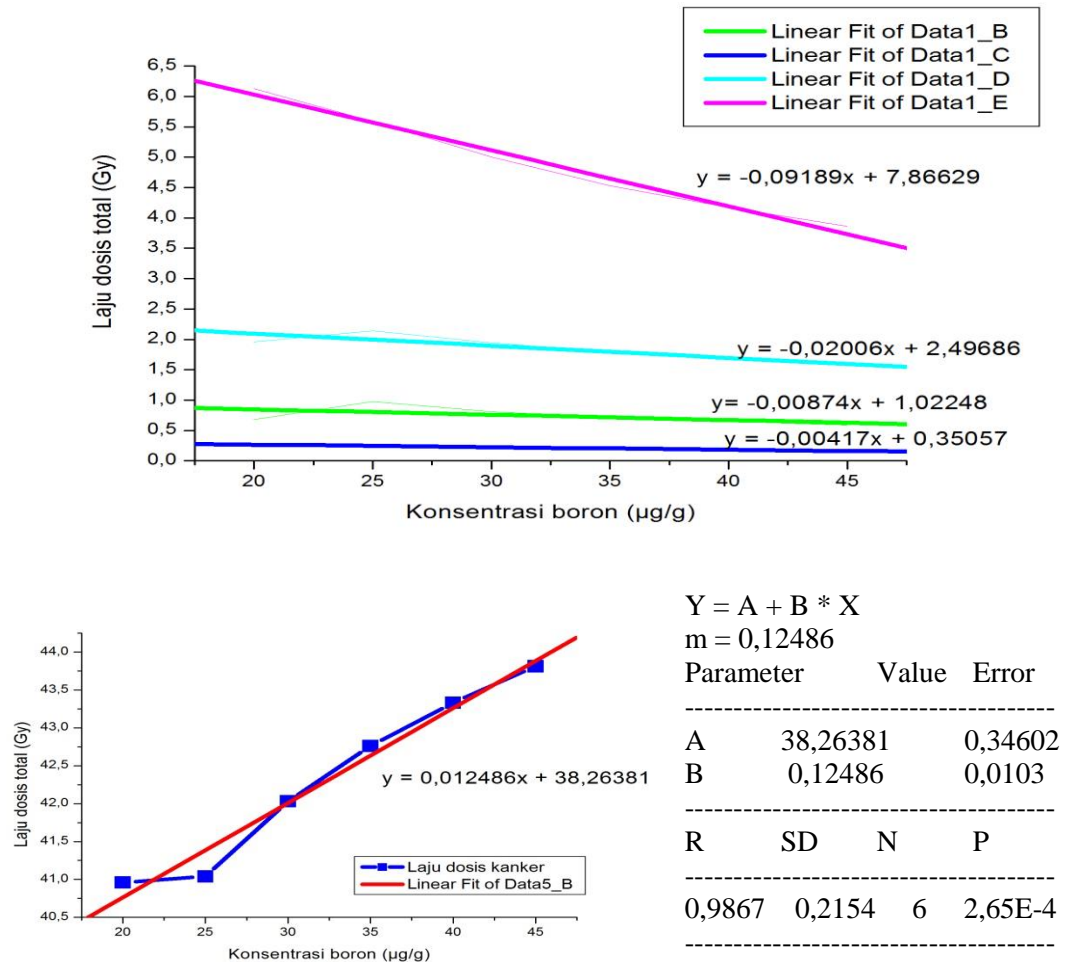


Gambar 15. Hubungan antara konsentrasi boron dengan waktu iradiasi

Dilihat dari Gambar 14, semakin besar konsentrasi boron yang diberikan, maka laju dosis semakin cepat. Dan dari Gambar 15 dapat dilihat bahwa waktu iradiasinya semakin singkat jika konsentrasi boron semakin besar. Dari Tabel 15 dapat ditentukan dosis serap tiap jaringan menurut persamaan 18, sehingga didapatkan Tabel 16. Hal ini menunjukkan kenaikan pada laju dosis dan penurunan pada waktu iradiasi secara linier dengan ditunjukkan pada persamaan garis $y=bx+a$, sehingga didapatkan gradien 0,00256 dan -0,316.

Tabel 16. Perbandingan dosis serap tiap jaringan antara konsentrasi 20 sampai 45 µgram / gram kanker.

Jaringan	Dosis serap total (Gy)					
	20 µg/g kanker	25 µg/g kanker	30 µg/g kanker	35 µg/g kanker	40 µg/g kanker	45 µg/g kanker
Kulit	0,68	0,98	0,81	0,72	0,65	0,59
Jaringan Sehat	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17
PTV	1,96	2,14	1,94	1,79	1,67	1,57
CTV	6,13	5,59	5,00	4,53	4,17	3,86
GTV	40,96	41,04	42,03	42,76	43,33	43,81



Gambar 17. Hubungan antara dosis serap dengan jaringan kanker

Dapat dilihat pada Gambar 16, grafik warna hijau menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis pada kulit menurun secara linear dengan persamaan garis $y = -0,00874x + 1,02248$ dan gradiennya $-0,00874$. Grafik warna biru menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis pada jaringan sehat menurun secara linear dengan persamaan garis $y = -0,00417x + 0,35057$ dan gradiennya $-0,00417$. Grafik warna biru muda menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis pada PTV meurun secara linear dengan persamaan garis $y = -0,02006x + 2,9686$ dan

gradiennya -0,02006. Grafik warna ungu menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis pada CTV secara linear dengan persamaan garis $y = -0,09189x + 7,86629$ dan gradiennya -0,009189. Grafik warna merah menunjukkan grafik hubungan antara konsentrasi boron dengan laju dosis pada GTV atau kanker naik secara linear dengan persamaan garis $y = -0,012486x + 38,2638$ dan gradiennya -0,012486. , sehingga pada jaringan sehat dosis serap mengalami penurunan, dan dosis makin tinggi ketika berada pada jaringan kanker atau GTV, dan semakin besar konsentrasi boron yang diinjeksikan maka makin sedikit dosis serap yang diterima pada tiap jaringan sehat secara linear.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian BNCT untuk penyembuhan kanker payudara dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Semakin besar konsentrasi Boron-10 yang diinjeksikan maka semakin laju dosis semakin tinggi secara linear untuk pengobatan kanker payudara.
2. Semakin besar konsentrasi Boron-10 yang diinjeksikan maka waktu iradiasi semakin menurun secara linear untuk pengobatan kanker payudara

B. Saran

Demi memperoleh hasil yang lebih baik maka saran yang diberikan untuk penelitian berikutnya adalah :

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang dosis kanker payudara dengan kolimator dan sumber yang sebenarnya dari Reaktor Kartini agar mendapatkan hasil yang lebih akurat lagi.
2. Pengambilan sampel data harus lebih spesifik lagi dengan mengambil data dari rumah sakit untuk pasien penderita kanker payudara dengan stadium tertentu
3. Pemilihan stadium yang lebih besar lagi, sehingga penelitian ini tidak hanya mengacu pada kanker yang belum bermetastasis.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander V, Safronov (2014). *Boron Neutron Capture Therapy of Cancer as a Part of Modern Nanomedicine*. International Journal of Medical Nano Reseach. Hlm 1:1.
- Arlen M, Freiman J, dan Lonescu M. (2011). *Infiltrating Ductal Carcinoma of the Breast Associated with Primary Breast Lymphoma*. International Journal of Cancer. Manhasset NY, USA. Hlm 189-192.
- Attix, H. (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Madsion : University of Wiscosin Medical Schoo.
- Badrুদ্ধoja, M. (2012). *Ductal Carcinoma In Situ of the Breast: Surgical Perspective*. *International Journal of Surgical Oncology*. Volme 2012, Article ID 761364, 12 pages, doi:10.1155/2012/123549.
- Bapeten. (2015). *Efek Radiasi pada Sistem Biologi*. Diakses dari ansn.bapeten.go.id/files/ins_Efek_Biologi.pdf. pada tanggal 13 April 2015
- Barth RF, Otto K, J Peter, Kiger W.S, Aihara T, Kato I, Kawabata S. (2012). *Current status of boron neutron capture therapy of high grade gliomas and recurrent head and neck cancer*. *Journal international radiation oncology*. Hlm 1-21.
- Bastings L, Beerendonk CCM, Westphal JR, Massuger L, Kaal S, Braat D. (2013). *Autotransplantation of Cryopreserved Ovarian Tissue in Cancer Survivors and the Risk of Reintroducing Malignancy: A Systematic Review*. *International journal Human Reproduction Update*, vol.19, No.5 pp.483-506. Hlm 484-506.

- Berlianti, Dwi S. (2013). *Analisis Dosis di Organ Kritis pada Trapi Glioblastoma dengan BNCT Menggunakan Metode Simulasi MCNP5*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Booth T.E, Avneet S, Goorley TJ, Jeffrey S, Brown BF, Arthure R. (2003). *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume II: User's Guide*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Breonna J dan Kenneth L. (2012). *A Comparison of Cholesterol Uptake and Storage in Inflammatory and Noninflammatory Breast Cancer Cells*. International Journal of Breast Cancer. Volume 2012 (2012), Article ID 412581, 10 pages.
- Cember H, Johnson T. (2009). *Health Physics*. New York: The Mc Graw-Hill Compaines. New York: The Mc Graw-Hill Compaines.
- Chiang D, Michael Le, Pauline G, dan Lydia L. (2013). *Amyloidosis of the Breast with Multicentric DCIS and Pleomorphic Invasive Lobular Carcinoma in a Patient with Underlying Extranodal Castleman's Disease*. International Journal Case Reports in Radiology. Volume 2013, Article ID 190856, 3 pages.
- Chiojdeanu C.F. Pavel,C. Constantin F. (2008) *Boron Neutron Capture Therapy Setup for A Liniear Accelerator*. National Institute for Physics and Nuclear Engineering.
- Ciprian C, Youlia M, Xavier L, Campana F, Peurien D, Amessis M, Bey P. (2013). *Helical Tomotherapy for Inoperable Breast Cancer: A New Promising Tool*. BioMed Research International, Volume 2013, Article ID 264306, 8 pages 8.
- Denise B, Pelowitz. (2008). *MCNPX User's Manual Vesion 2.6.0*. Los Alamos National Laboratory. New Mexico: Los Alamos.

- Emiliano, Trivillin, Lucas L, Ana J, Jorge E, Elisa M, Curotto P, Romina F, David W, Amanda E, Marcela A. (2013). *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Liver Metastasis in an Experimental model : Dose –Response at Five-Week Follow-up Based on Retrospective dose assesment in individual rats*. Journal international Radiat Environ Biopys (2013) 52:481-491.
- Fattaneh A, Tavassoli, Peter D. (2003). *Pathology and Genetics of Tumours of the Breast and Fimale Genital Organs*. Rev.ed. Lyon, France: IARC Press.
- Fauziah, Nina. (2013). *A Conceptual Design of Neutron Collimator in The Thermal Column Of Kartini Research Reactor for Boron Neutron Capture Therapy*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Fernanda F, Paulo R, Arruda-Neto, Camillo P, Dias J, Eli R, Eduardo J, Augusto D. (2012). *Boron Uptake in Normal Melanocytes and Melanoma Cells and Boron Biodistribution Study in Mice Bearing B16f10 Melanoma For Boron Neutron Capture Therapy*. Jurnal intrnasional Radiat Environ Biophys (2012) 51:319–329.
- Gann T, Chih-Hsien Chang, Wang H, Lee T. (2010). *Nanotargeted Radionuclides for Cancer Nuclear Imaging and Internal Radiotherapy*. International Journal of Biomedicine and Biotechnology. Volume 2010, Article ID 953537, 17 pages doi:10.1155/2010/953537.
- GLOBOCAN. (2012). *Estimated Cancer Incidence, Morality and Prevelence Worldwide in 2012*. World Helth Organization: International Agency for Research on Cancer.

- Greg J, Dabbs DJ, Peter C, Jankowitz R.C, Daniel D, Pricilla F, Beth Z, Rachel C. (2015). *Molecular drivers of lobular carcinoma in situ*. Breast Cancer Research. DOI 10.1186/s13058-015-0580-5
- Harmon C, Busch R, Judith F, Arthur R. (1994). *Criticaly Calculation with MCNP A Primer*. Mexico: Los Alamos National Laboratory
- Hitoshi F, Yuichiro D, Yasuhiko T, Matsuyama A, Komoda H, Masao S, Minoru S, Kirihata M, Kaneda Y, Sawa Y, Lee CM, Asano T, Kojo O. (2011). *Cationized gelatin-HVJ envelope with sodium borocaptate improved the BNCT efficacy for liver tumors in vivo*. International Journal of Radiation Oncology. Department of Surgery, Osaka University Graduate School of Medicine, Osaka, Japan.
- Huang, J. (2009). *Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments*. University of surrey.
- IAEA. (2001). *Current Satus of Neutron Capture Therapy*. Wina: IAEA.
- IAEA. (2014). *PACT: Together Against Cancer. PACT Programme Office. International Atomic Energy Agency. Venna: Vienna International Centre*.
- Ikuko A, Sugiyama K, Masaru S, Igari F, Saito M, Kasumi F, Senuma K, Arakawa A. (2012). *Extramammary Paget's Disease Covered the Left Nipple and Areola*. International Journal Medicine and Healthcare Volume 3 No.1 PP. 65-68.
- Irhas. (2014). *Dosimetri BNCT pada kanker Hati (Hepatocellular Carcinoma) Menggunakan MCNP-Code dengan Sumber Neutron dari Kolom Termal Reaktor Kartini*. Skripsi. FT-UGM.
- Joanna, Kruk. (2014). *Overweight, Obesity, Oxidative Stress and the Risk of Breast Cancer*. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, Vol 15.Hlm 9579-9586.

- John D, David W, dan Frederick M. (2013). *Computational Characterization and Experimental Validation of the Thermal Neutron Source for Neutron Capture Therapy Research at the University of Missouri*. International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering (M&C 2013), Sun Valley, Idaho, USA.
- Juliana R.T, Eliana Z and Maria H. 2014. *Factors Associated with the Incidence of Local Recurrences of Breast Cancer in Women Who Underwent Conservative Surgery*. International Journal of Breast Cancer Volume 2014, Article ID 639534, 9 pages.
- Leena K, Hanna, Kauko K, Kouri M, Joensuu H, Minn H, Tina S, Atula T. (2012). *Boron Neutron Capture Therapy In The Treatment Of Locally Recurred Head-And-Neck Cancer: Final Analysis Of A Phase I/Ii Trial*. International Journal of Radiation Oncology. Vol. 82, No. 1, pp. e67–e75.
- Mostafa S, Kholasehzadeh G, Hossein N, Kargar S. (2014). *Health Beliefs and Breast Cancer Screening Behaviors among Iranian Female Health Workers*. Research article. Doi:10.7314 apjcp. 2014.15.22.9817.
- Muslih, Ilma. (2013). *Perancangan Kolimator di Beam Port Tembus Reaktor Kartini untuk BNCT*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Muslih, Ilma. (2015). *Dasar-Dasar Pemrograman MCNPX*. Yogyakarta: PSTA-BATAN
- National Breast Cancer Centre. (2003). *The Clinical Management of Ductal Carcinoma In Situ, Lobular Carcinoma In Situ and Aypical Hypeplasia of the Breast: Edisi I*. Australia: National Breast Cancer Centre Funded by the Department of Health and Ageing.

Nuclear Energy Agency. (2011). *Evolution of ICRP Recommendations 1997, 1990, and 2007*. England: OECD

Peter J, Charles A, Seth A, John D, David W, Aslam A, Natalia I, Frederick M, Satish S. (2013). *Boron neutron capture therapy demonstrated in mice bearing EMT6 tumors following selective delivery of boron by rationally designed liposomes*. Journal International Institute.

Rakha A, Andrew HS, Lee, Andrew JE, Menon S, Nancy Y, Hodi Z, Macmillan D, Roger W, Ellis O. (2010). *Tubular Carcinoma of the Breast: Further Evidence to Support Its Excellent Prognosis*. Journal of Clinical Oncology, Volume 28 No. 1. Amerika: American Society of Clinical Oncology.

Ravnik, M. (1999). *Description of TRIGA Reactor*. Fuel Element Burnup Determination in Mixed TRIGA Core Using Reactor Calculations, Nuclear Technology 128, 35-45

Ryan D, Peter M, Rana, dan Kullervo Hynynen. (2013). *Enhancing drug delivery for boron neutron capture therapy of brain tumors with focused ultrasound*. Journal international Neuro-oncology. 15(9):1225–1235, 2013. doi:10.1093/neuonc/not052. Hlm 1225-1235.

Savolainen S, Kortnesniemi M, Hanna K, Antti K, Timonen M, Reijonen V, Linda K, Salli E. (2013). *Boron neutron capture therapy (BNCT) in Finland: Technological and physical prospects after 20 years of experiences*. Journal Physica Medica, 29. Hlm 233-248.

Setiyadi, A. (2015). *Dosis Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada kanker kulit (melanoma maligna) menggunakan mcnp-code dengan sumber Neutron dari beamport tembus reaktor kartini*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

- Shintaro I. (2014). *Deterministic Parsing Model of the Compound Biological Effectiveness (CBE) Factor for Intracellular ¹⁰Boron Distribution in Boron Neutron Capture Therapy*.
- Suzuki M, Ituro K, Aihara T, Hiratsuka J, Niimi M, Kimura Y, Fukushima M. (2014). *Boron Neutron Capture Therapy Outcomes for Advanced or Recurrent Head and Neck Cancer*. Journal of Radiation Research, 2014, 55, 146–153. doi: 10.1093/jrr/rrt098.
- Takada K, Isobe T, Hiroaki K, Yamamoto T, Mori Y, Sakurai H. (2014). *Evaluation of the Radiation Dose for Whole Body in Boron Neutron Capture Therapy*. Journal international: Progress in Nuclear Science and Technology, Volume 4 pp. 820-823.
- Wagner, F.M, Loeper-Kabasakal dan H. Breitzkreutz. (2012). *Neutron medical treatment of tumours a survey of facilities. 2nd International Workshop on Fast Neutron Detectors and Applications*. November 6–11 2011. Ein Gedi, Israel.
- Wiryosimin, S. (1996). *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*. Bandung: ITB Bandung.
- Wolfgang A.G, Andrea W, Nakagawa Y. 2012. *Neutron Capture Therapy: Principles and Applications*. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer.
- World Cancer Report 2014. (2014). *World Cancer Report 2014*. World Helth Organization. USA : International Agency for Research on Cancer.
- World Health Organization.(2012). *Latest world cancer statistics Global cancer burden rises to 14.1 million new cases in 2012: Marked increase in breast cancers must be addressed*. Jenewa.
- World Health Organization.(2014). *Cancer Country Profiles 2014*.World Health Organization. Jakarta, Indonesia.

Yuswanto. (2015). *Sisi lain dari Boraks*. Diakses tanggal 10 Oktober 2014.
<https://agyuswanto.wordpress.com/2015/06/24/sisi-lain-dari-boraks-borax>.

Zarma, Mirea, dan Poroschianu. (2014). *Implementing BNCT Through the Use of An Electron Accelerator*. Journal International Romanian Reports in Physics, Vol. 66, No. 1, P. 182–191. Predeal, Romania.

Zhou W, Sollie T, Sarah E. (2014). *Breast Cancer with Neoductgenesis: Histopathological Criteria and Its Correlation with Mammographic and Tumour Features*. International Journal of Breast Cancer. Sweden: Hindawi Publishing Corporation.

Zhu Y, Lin Y, Zhun Y, Lu Jia, Maguire A. J, Hosmane S.N. (2010). *Boron Drug Delivery via EncapsulatedMagnetic Nanocomposites: A New Approach for BNCT in Cancer Treatment*. Journal of Nanomaterials. Volume 2010, Article ID 409320, 8 pages. doi:10.1155/2010/409320. Hindawi Publishing Corporation.

Zhu Y dan Hosmane S.N. (2013). *Boron-enriched Nanocomposites: Future Perspective of Boron-based Medicinal Chemistry*. Biochemical and biophysical journal of neutron therapy & cancer treatments vol1.no.1.

LAMPIRAN 1

Contoh Kode Input MCNPX : Konsentrasi Boron 45 µgram / gram kanker

Simulasi BNCT

C ----Bismillah---

c -----

c cell card

c ---- udara ----

1 2 -0.001205 -1 2 -3 (12:13:14) &

#12 #3 #4 #5 #6 #13 &

#14 #15 #16 imp:n=1 imp:p=1

2 1 -1.6 1 -4 2 -3 imp:n=1 imp:p=1

c ---- Breast ----

3 9 -1.1 -5 -6 16 imp:n=1 imp:p=1 \$kulit

4 3 -0.21 2 -3 6 -7 8 -9 10 -11 #14 &

#15 #16 imp:n=1 imp:p=1 \$badan

12 3 -0.21 -16 -6 12 #5 #6 #7 #13 imp:n=1 imp:p=1 \$breast

c ----Cancer----

5 6 -0.21 -12 13 imp:n=1 imp:p=1 \$ PTV

6 5 -1.05 14 -13 imp:n=1 imp:p=1 \$ CTV

7 4 -1.05 -14 #5 #6 imp:n=1 imp:p=1 \$ GTV

c --kolimator--

8 2 -2.6989 -2 -15 17 imp:n=1 imp:p=1

9 7 -2.6989 -2 -18 -20 19 imp:n=1 imp:p=1

10 8 -8.902 -18 20 -17 imp:n=1 imp:p=1

11 0 (-19:18:15) (4:-2:3) imp:n=0 imp:p=0

c cacah

13 3 -0.21 -16 -21 -5 12 imp:n=1 imp:p=1 \$breast

14 3 -0.21 2 -3 6 -22 8 -9 10 -11 imp:n=1 imp:p=1 \$badan

15 3 -0.21 2 -3 22 -23 8 -9 10 -11 imp:n=1 imp:p=1 \$badan

16 3 -0.21 2 -3 23 -24 8 -9 10 -11 imp:n=1 imp:p=1 \$badan

c surface card

c udara

1 cy 75.5

2 py 0

3 py 100

4 cy 75.75

c Breast

5 sy 10 7

6 py 11

7 py 15

8 px -10

9 px 10

10 pz -12

11 pz 12

16 sy 10 6.75

c Cancer

12 sy 7 2.5

13 sy 7 2

14 sy 7 1.5

c Ujung Kolimator

15 ky 2 1 -1

17 py -19

18 cy 21

19 py -94

20 py -34

c cacah

21 py 7.0

22 py 12

23 py 13

24 py 14

C -----

c data card

mode n p

SDEF POS 0 1.83 0 ERG=d1 PAR=n

SI1 H 0 5e-7 0.01

SP1 D 0 0.007 0.993

m1 6000.66c -1.000 \$ Graphite

m7 13027 1.000000 \$ Aluminium

m2 7014.62c -0.755268 6000.66c -0.00012 8016.66c -0.231781 &
18000.35c -0.012827 \$ udara

m3 1001.62c 0.625777 6012.50c 0.164480 7014.62c 0.012745 &
8016.66c 0.196006 11023.62c 0.000259 &
15031.66c 0.000192 16032.62c 0.000371 &

17000.66c 0.000168 5010.66c 2.4771E-06 \$Jaringan Sehat

m4 1001.62c 0.61396 6012.50c 0.139982 &

7014.62c 0.020083 8016.66c 0.222312 &

15031.66c 0.003633 5010.66c 2.3419E-05 \$ GTV

m5 1001.62c 0.613963 6012.50c 0.139998 7014.62c 0.020083 &

8016.66c 0.222312 15031.66c 0.003633 &

5010.66c 2.3419E-05 \$CTV

m6 1001.62c 0.625772 6012.50c 0.164479 7014.62c 0.012745 &

8016.66c 0.196004 11023.62c 0.000259 &

15031.66c 0.000192 16032.62c 0.000371 &

17000.66c 0.000168 5010.66c 2.2293E-05 \$ PTV

m8 28000.50c -1.000000 \$Nikel-60

m9 1001.62c 0.619966 6000.66c 0.118059 7014.62c 0.020589 &

8016.66c 0.240350 11023.62c 0.000019 12000.62c 0.000015 &

15031.66c 0.000066 16000.62c 0.000308 17000.66c 0.000468 &

19000.62c 0.000135 20000.62c 0.000023 26000.55c 0.000001 &

30000.42c 0.000001 \$kulit

f2:n 5 6 7 12 13 14 16 21 22 23 24

SD2 308 1004 1004 79 50.286 28.29 286.393 134.357 1004 1004 1004

fm2 1e+14

e2 5e-7 0.01 20

f4:n 8 3 4 5 6 7 12 13 14 15 16 \$fluks neutron

fm4 1e+13

e4 5e-7 0.01 20

f34:n 8 3 4 5 6 7 12 13 14 15 16 \$Dosis Neutron

fm34 7.553e15

e34 5e-7 0.01 20

de34 3.6E-7 6.3E-7 1.1E-6 2E-6 3.6E-6

6.3E-6 1.1E-5 2E-5 3.6E-5 6.3E-5

1.1E-4 2E-4 3.6E-4 6.3e-4 1.1e-3

2e-3 3.6e-3 6.3e-3 0.011 0.02

0.036 0.063 0.082 0.086 0.09

0.094 0.098 0.105 0.115 0.125

0.135 0.145 0.155 0.165 0.175

0.185 0.195 0.21 0.23 0.25

0.27 0.29 0.31 0.33 0.35

0.37 0.39 0.42 0.46 0.5

0.54 0.58 0.62 0.66 0.7

0.74 0.78 0.82 0.86 0.9

0.94 0.98 1.05 1.15 1.25

1.35 1.45 1.55 1.65 1.75

1.85 1.95 2.1 2.3 2.5

2.7 2.9 3.1 3.3 3.5

3.7 3.9 4.2 4.6 5

5.4 5.8 6.2 6.6 7

7.4 7.8 8.2 8.6 9

9.4 9.8 10.5 11.5 12.5

df34 5.06E-14 3.84e-14 2.91e-14 2.17e-14 1.64e-14

1.28e-14 1.03e-14 8.92e-15 8.87e-15 1.05e-14

1.45e-14 2.33e-14 3.97e-14 6.78E-14 1.17e-13

2.1e-13 3.73e-13 6.42e-13 1.09e-12 1.09e-12
 1.88e-12 3.11e-12 4.82e-12 5.86e-12 6.05e-12
 6.24e-12 6.44e-12 6.62e-12 6.92e-12 7.35e-12
 7.76e-12 8.13e-12 8.50e-12 8.86e-12 9.19e-12
 9.51e-12 9.83e-12 1.01e-11 1.06e-11 1.11e-11
 1.16e-11 1.21e-11 1.27e-11 1.31e-11 1.36e-11
 1.41e-11 1.46e-11 1.52e-11 1.66e-11 1.64e-11
 1.65e-11 1.71e-11 1.77e-11 1.83e-11 1.89e-11
 1.95e-11 2e-11 2.06e-11 2.11e-11 2.16e-11
 2.23e-11 2.33e-11 2.5e-11 2.52e-11 2.52e-11
 2.63e-11 2.71e-11 2.76e-11 2.83e-11 2.94e-11
 2.99e-11 3.12e-11 3.13e-11 3.24e-11 3.29e-11
 3.44e-11 3.59e-11 3.75e-11 3.85e-11 4.19e-11
 4.29e-11 4.4e-11 4.33e-11 4.43e-11 4.43e-11
 4.68e-11 4.57e-11 4.77e-11 4.92e-11 5.07e-11
 5.19e-11 5.42e-11 5.47e-11 5.41e-11 5.56e-11
 5.66e-11 5.83e-11 5.96e-11 6.01e-11 6.38e-11

f24:p 8 3 4 5 6 7 12 13 14 15 16 \$dosis gamma

fm24 1e+14

de24 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006

0.008 0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 0.05

0.06 0.08 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4

0.5 0.6 0.8 1 1.25 1.5 2

3 4 5 6 8 10 15

20

df24 5.63e-10 2.83e-10 1.68e-10 8.07e-11 4.7e-11
3.02e-11 2.09e-11 1.16e-11 7.24e-12 3.04e-12
1.64e-12 7.02e-13 4.23e-13 3.25e-13 2.98e-13
3.27e-13 4.03e-13 6.61e-13 9.43e-13 1.52e-12
2.09e-12 2.62e-12 3.13e-12 4.08e-12 4.93e-12
5.89e-12 6.76e-12 8.29e-12 1.09e-11 1.31e-11
1.52e-11 1.71e-11 2.09e-11 2.47e-11 3.39e-11
4.33e-11
nps 1000000

LAMPIRAN 2

Perhitungan Massa Boron-10 pada Tiap Jaringan

Contoh untuk perhitungan konsentrasi Boron-10 sebanyak 45 µ gram/gram kanker (Charles et.al, 1994).

1. Kanker (*Gross Kanker Volume*)

$$V = 0,5238 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa Jenis } (\rho) = 1,144 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} m_{\text{kanker}} &= V \times \rho \\ &= 0,599243 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{boron-10}} &= 45 \times 10^{-6} \text{ g / g kanker} \times 0,599243 \text{ g} \\ &= 2,6966\text{E-}05 \text{ gram} \end{aligned}$$

Massa boron yang terdistribusi dalam kanker dianggap sebesar 90% dari massa boron total, sehingga massa boron yang ada di kanker adalah 2,4269E-05 gram

2. Penghitungan fraksi atom di kanker

$$\text{Persen boron} = \frac{\text{massa boron}}{\text{massa boron} + \text{massa total jaringan kanker}} \times 100\%$$

$$\text{Persen boron} = \frac{2,4269\text{E-}05}{2,4269\text{E-}05 + 0,599243} \times 100\%$$

$$\text{Persen boron} = 0,00404984\%$$

$$\text{Persen kanker} = \frac{\text{massa kanker}}{\text{massa boron} + \text{massa total jaringan kanker}} \times 100\%$$

$$\text{Persen kanker} = \frac{0,599243}{2,4269\text{E-}05 + 0,599243} = 99,996 \%$$

$$\rho_{\text{campuran}} = \frac{\rho_{\text{boron}} \times \rho_{\text{kanker}}}{(\% \text{ kanker} \times \rho_{\text{boron}}) + (\% \text{ boron} \times \rho_{\text{kanker}})}$$

$$\rho_{\text{campuran}} = \frac{2,37 \text{ (gr/cm}^3\text{)} \times 1,44 \text{ (gr/cm}^3\text{)}}{(99,996 \% \times 2,37 \text{ (gr/cm}^3\text{)}) + (0,00404984\% \times 1,44 \text{ (gr/cm}^3\text{)})}$$

$$\rho_{campuran} = 1,14403397 \text{ gram/cm}^3$$

massa tiap atom kanker = persen massa tiap unsur penyusun kanker x massa total kanker maka nilai massa tiap atom kanker ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Nama Jaringan	unsur	persen unsur (%)	massa per unsur (gram)	persen unsur baru / W_f (%)
GTV	H	9,9	0,05932509	9,899599082
	C	26,9	0,161196457	26,89891064
	N	4,5	0,02696595	4,499817765
	O	56,9	0,340969457	56,89769574
	P	1,8	0,01078638	1,799927106
	Boron-10	0,00404984	2,42684E-05	0,004049672

$$\text{Fraksi atom unsur} = \frac{\text{densitas atom ke } - i}{\text{densitas atom total jaringan organ}}$$

$$\text{Densitas atom } (P_{atom}) = \frac{\rho_{campuran} \times W_f \text{ per unsur} \times \text{bilangan avogadro}}{Ar \text{ atom}}$$

$$\text{Densitas atom boron} = \frac{1,14403397 \frac{\text{gram}}{\text{cm}^3} \times 0,004049672\% \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom} \frac{\text{cm}^2}{\text{mol}_b}}{10,81 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}}$$

$$\text{Densitas atom boron} = 2,58092 \times 10^{20} \text{ atom} \cdot \text{cm}^2 / \text{mol}_b$$

$$\text{Fraksi atom boron} = \frac{2,58092 \times 10^{20} \text{ atom} \cdot \text{cm}^2 / \text{mol}_b}{1,10208 \times 10^{25} \text{ atom}} = 2,34186\text{E-}05$$

Untuk fraksi atom dan densitas atom unsur penyusun kanker yang lainnya dapat dicari dengan cara sama.

Tabel hasil perhitungan fraksi atom setiap unsur pada jaringan kanker

ρ campuran (gr/cm ³)	Bilangan Avogadro	Ar (gr/mol)	Densitas atom (P_{atom})	fraksi atom	jumlah P_{atom} total
1,144033967	6,022E+23	1,00797	6,76628E+24	0,613955287	1,10208E+25
1,144033967	6,022E+23	12,01115	1,54287E+24	0,139996393	1,10208E+25
1,144033967	6,022E+23	14,0067	2,21329E+23	0,020082873	1,10208E+25
1,144033967	6,022E+23	15,9994	2,45003E+24	0,222309348	1,10208E+25
1,144033967	6,022E+23	30,9738	4,0035E+22	0,00363268	1,10208E+25
1,144033967	6,022E+23	10,81	2,58092E+20	2,34186E-05	1,10208E+25

LAMPIRAN 3

Perhitungan Laju Dosis Boron, Dosis Proton, Dosis Hamburan Neutron dan Dosis Gamma

Contoh perhitungan laju dosis tiap komponen radiasi dan laju dosis total pada kanker dengan konsentrasi Boron 45 µg/g kanker.

1. Laju dosis hamburan neutron

$$\dot{D} = 3,83573 \times 10^{-4} \text{ Gy/detik}$$

2. Laju dosis sinar gama

Laju dosis sinar gamma hasil reaksi adalah :

Dosis dari reaksi neutron dengan materi jaringan kanker

$$\Phi_{\text{termal}} = 7,61740 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{kanker}} = 0,000599243 \text{ kg}$$

$$Ar_{\text{Hidrogen-kanker}} = 2 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{hidrogen}} &= \text{persen hidrogen} \times m_{\text{kanker}} \\ &= 0,00101 \times 0,599243333 \text{ g} \\ &= 0,000605236 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{\text{Hidrogen-kanker}} &= \frac{\left(\frac{m(g)}{Ar(g/mol)} \right)_{\text{Hidrogen}} \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{\text{kanker}} (kg)} \\ &= \frac{\left(\frac{0,000605236}{2} \right) \times 6,023 \times 10^{23}}{0,000599243} \\ &= 3,04162 \times 10^{23} \text{ atom/kg} \end{aligned}$$

Laju pelepasan sinar gamma yang dihasilkan di dalam kanker adalah:

$$\text{Tampang lintang hidrogen } (\sigma_{H-1}) = 3,31960 \times 10^{-25}$$

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= \Phi \cdot N_{\text{Hidrogen-kanker}} \cdot \sigma_{H-1} \\ &= 7,61740 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 2,98139 \times 10^{25} \cdot 3,31960 \times 10^{-25} \\ &= 7,69125 \times 10^8 \text{ Bq/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= 2,33 \frac{\text{MeV}}{\gamma} \times 1,6 \times 10^{-13} \\ &= 3,568 \times 10^{-13} \frac{\text{Gy/detik}}{\text{Bq/kg}} \end{aligned}$$

$$\phi = 1,78 \times 10^{-1} \text{ (hasil interpolasi pada tabel fraksi serapan dengan sumber berada di payudara dan target adalah payudara)}$$

$$\begin{aligned}\dot{D} &= \ddot{R} \cdot \Delta \cdot \phi \\ &= 7,69125 \times 10^8 \times 3,568 \times 10^{-13} \times 1,78 \times 10^{-1} \\ &= 4,885 \times 10^{-5} \text{ Gy/detik}\end{aligned}$$

Laju dosis sinar gamma yang berasal dari jaringan lain didapatkan dengan perhitungan yang sama tetapi nilai koefisien dosis serapnya berbeda sesuai dengan tabel di Lampiran 4, sehingga didapatkan laju dosis total sinar gamma adalah $2,613 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}$.

3. Laju dosis alfa

$$\Phi_{\text{thermal}} = 7,61740 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{kanker}} = 0,000599243 \text{ kg}$$

$$Ar_{\text{boron}} = 10,81 \text{ g/mol}$$

$$\sigma_{\text{boron}} = 3,8637 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$$

$$m_{\text{boron}} = 2,43\text{E-}05 \text{ g}$$

$$\begin{aligned}E &= 2,33 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \\ &= 3,728 \times 10^{-13} \text{ J}\end{aligned}$$

$$N_{\text{boron}} = \frac{\left(\frac{2,43\text{E-}05 \text{ g}}{10,81}\right) \times 6,023 \times 10^{23}}{0,000599243}$$

$$= 2,2565 \times 10^{21} \text{ atom/kg}$$

$$\begin{aligned}\dot{D} &= N_{\text{boron}} \cdot \Phi \cdot \sigma_{\text{boron}} \cdot E \\ &= 2,2565 \times 10^{21} \times 7,61740 \times 10^9 \times 3,8637 \times 10^{-21} \times 3,728 \times 10^{-13} \\ &= 2,58415 \times 10^{-2} \text{ Gy/detik}\end{aligned}$$

4. Laju dosis proton

$$\Phi_{\text{thermal}} = 7,61740 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{kanker}} = 0,000599243 \text{ kg}$$

$$Ar_{\text{nitrogen}} = 14,008 \text{ g/mol}$$

$$\sigma_{\text{nitrogen}} = 1,8269 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$m_{\text{nitrogen}} = 0,02696595 \text{ g}$$

$$E = 0,63 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 1,008 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\begin{aligned}
N_{nitrogen} &= \frac{\left(\frac{0,02696595}{14,008}\right) \times 6,023 \times 10^{23}}{0,000599243} \\
&= 1,93596 \times 10^{24} \text{ atom/kg} \\
\dot{D} &= N_{nitrogen} \cdot \Phi \cdot \sigma_{nitrogen} \cdot E \\
&= 1,93596 \times 10^{24} \times 7,61740 \times 10^9 \times 1,8269 \times 10^{-24} \times 1,008 \times 10^{-13} \\
&= 2,96947 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

5. Laju dosis total

$$\begin{aligned}
\dot{D}_{total} &= (W_B \times \dot{D}_{alfa}) + (W_p \times \dot{D}_{proton}) + (W_n \times \dot{D}_{neutron}) + (W_\gamma \times \dot{D}_\gamma) \\
&= (3,8 \times 2,58415 \times 10^{-2}) + (2 \times 2,96947 \times 10^{-3}) + \\
&\quad (3,2 \times 3,83573 \times 10^{-4}) + (1 \times 4,885 \times 10^{-5}) \\
&= 1,05413 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

LAMPIRAN 4

**Tabel Perbandingan Laju Dosis Gamma antara konsentrasi Boron
20 – 45 µgram / gram kanker**

Jaringan	Laju Dosis Gamma (Gy / detik)					
	20 µgr/gr kanker	25 µgr/gr kanker	30 µgr/gr kanker	35 µgr/gr kanker	40 µgr/gr kanker	45 µgr/gr kanker
Kulit	1,9757E-07	3,9079E-07	3,8304E-07	3,8301E-07	2,7867E-05	3,8251E-07
Jaringan Sehat	2,9333E-06	3,4026E-06	3,1773E-06	3,176E-06	4,2318E-05	3,1735E-06
PTV	1,6158E-05	2,3971E-05	2,3965E-05	2,3944E-05	0,00029771	2,3882E-05
CTV	2,8861E-05	3,4049E-05	3,6447E-05	3,6421E-05	0,00045299	3,6374E-05
GTV	4,1751E-05	4,8078E-05	4,8964E-05	4,8952E-05	0,02296272	4,8847E-05

**Tabel Perbandingan Laju Dosis Recoil Proton antara konsentrasi Boron
20 – 45 µgram / gram kanker**

Jaringan	Laju Dosis Proton (Gy / detik)					
	20 µgr/gr kanker	25 µgr/gr kanker	30 µgr/gr kanker	35 µgr/gr kanker	40 µgr/gr kanker	45 µgr/gr kanker
Kulit	2,969E-04	5,756E-04	5,756E-04	5,755E-04	5,749E-04	5,748E-04
Jaringan Sehat	1,19E-04	1,288E-04	1,288E-04	1,287E-04	1,287E-04	1,286E-04
PTV	6,474E-04	9,604E-04	9,602E-04	9,593E-04	9,583E-04	9,569E-04
CTV	2,558E-03	3,231E-03	3,231E-03	3,228E-03	3,226E-03	3,224E-03
GTV	2,538E-03	2,982E-03	2,977E-03	2,976E-03	2,968E-03	2,969E-03

**Tabel Perbandingan Laju Dosis Recoil Proton antara konsentrasi Boron
20 – 45 µgram / gram kanker**

Jaringan	Laju Dosis Boron (Gy / detik)					
	20 µgr/gr kanker	25 µgr/gr kanker	30 µgr/gr kanker	35 µgr/gr kanker	40 µgr/gr kanker	45 µgr/gr kanker
Kulit	7,204E-06	7,56E-05	0,000576	2,44E-05	2,79E-05	3,134E-05
Jaringan Sehat	1,955E-05	2,65E-05	0,000129	3,70E-05	4,23E-05	4,758E-05
PTV	0,0001006	1,86E-04	0,00096	2,61E-04	2,98E-04	3,344E-04
CTV	0,0001797	2,84E-04	0,003231	3,97E-04	4,53E-04	5,093E-04
GTV	0,0098292	1,44E-02	0,002977	2,01E-02	2,30E-02	2,584E-02

LAMPIRAN 5

1. Sumber pada payudara

Specific Absorbed Fraction of Photon Energy in kg-1: Recommended Values for Age 15 Male or Adult Female												
Source = Breasts												
Energy (MeV)												
Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Adrenals	0.0	0.0	3.02E-07	4.12E-04	2.34E-03	3.10E-03	2.83E-03	3.14E-03	3.30E-03	3.12E-03	2.98E-03	2.89E-03
UB_Wall	0.0	0.0	1.19E-07	1.74E-05	9.24E-05	1.74E-04	2.83E-04	2.83E-04	3.56E-04	3.93E-04	4.21E-04	4.13E-04
Bone Sur	5.60E-05	1.73E-03	6.41E-03	1.22E-02	1.15E-02	5.61E-03	3.29E-03	2.78E-03	2.74E-03	2.52E-03	2.36E-03	2.12E-03
Brain	0.0	0.0	1.10E-06	6.59E-05	1.40E-04	2.47E-04	4.12E-04	5.29E-04	5.83E-04	6.14E-04	6.72E-04	6.72E-04
Breasts	2.62E+00	2.26E+00	1.72E+00	8.78E-01	3.36E-01	1.97E-01	2.09E-01	2.24E-01	2.13E-01	1.94E-01	1.78E-01	1.42E-01
St_Wall	0.0	6.28E-08	3.99E-05	1.89E-03	3.77E-03	4.41E-03	3.93E-03	4.03E-03	3.88E-03	3.77E-03	3.72E-03	3.73E-03
SI_Wall	0.0	0.0	7.12E-10	7.54E-06	1.54E-04	4.73E-04	5.07E-04	8.63E-04	9.54E-04	1.03E-03	1.07E-03	9.50E-04
ULI_Wall	0.0	0.0	2.37E-09	1.51E-05	2.53E-04	8.52E-04	9.72E-04	1.06E-03	1.11E-03	1.12E-03	1.12E-03	1.09E-03
LIJ_Wall	0.0	0.0	0.0	1.51E-06	5.55E-05	1.77E-04	2.87E-04	4.10E-04	4.83E-04	5.23E-04	5.40E-04	5.14E-04
Kidneys	0.0	0.0	1.66E-08	7.77E-05	6.10E-04	1.30E-03	1.38E-03	1.48E-03	1.60E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.52E-03
Liver	0.0	1.17E-07	1.09E-04	1.82E-03	4.60E-03	4.33E-03	4.41E-03	4.57E-03	4.73E-03	4.57E-03	4.35E-03	3.75E-03
ET1-bas	0.0	0.0	2.88E-07	2.49E-04	1.48E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.38E-03	2.67E-03	2.81E-03	2.83E-03	2.52E-03
ET2-bas	0.0	0.0	2.88E-07	2.49E-04	1.48E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.38E-03	2.67E-03	2.81E-03	2.83E-03	2.52E-03
LN-ET	0.0	0.0	2.88E-07	2.49E-04	1.48E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.38E-03	2.67E-03	2.81E-03	2.83E-03	2.52E-03
BBI-bas	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
BBI-sec	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
bbe-sec	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
AI	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
LN_Th	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
Ln_Tiss	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
Lung_NP	0.0	0.0	2.88E-07	2.49E-04	1.48E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.38E-03	2.67E-03	2.81E-03	2.83E-03	2.52E-03
Lung_TB	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
Lung_P	5.41E-06	2.72E-04	4.37E-03	1.84E-02	1.85E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.11E-02	1.02E-02	8.20E-03
Muscle	4.58E-04	1.35E-03	2.38E-03	3.50E-03	3.32E-03	2.64E-03	2.69E-03	2.89E-03	2.93E-03	2.81E-03	2.67E-03	2.31E-03
Ovaries	0.0	0.0	6.63E-07	7.14E-05	1.23E-04	1.99E-04	3.33E-04	4.45E-04	5.07E-04	5.49E-04	6.49E-04	6.49E-04
Pancreas	0.0	0.0	2.49E-06	6.56E-04	2.95E-03	3.57E-03	3.56E-03	4.02E-03	3.98E-03	3.92E-03	3.76E-03	2.88E-03
R_Marrow	1.84E-05	5.00E-04	1.75E-03	3.13E-03	3.22E-03	2.90E-03	2.95E-03	3.33E-03	3.28E-03	3.00E-03	2.80E-03	2.48E-03
Skin	1.27E-02	1.97E-02	2.00E-02	1.31E-02	6.25E-03	4.11E-03	4.41E-03	5.04E-03	4.85E-03	4.51E-03	4.23E-03	3.63E-03
Spleen	0.0	0.0	1.27E-06	7.17E-04	2.03E-03	2.71E-03	2.59E-03	2.79E-03	2.80E-03	2.80E-03	2.77E-03	2.58E-03
Testes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Thymus	0.0	1.57E-05	1.49E-03	1.28E-02	2.06E-02	1.60E-02	1.56E-02	1.56E-02	1.57E-02	1.53E-02	1.46E-02	1.22E-02
Thyroid	0.0	0.0	2.88E-07	2.49E-04	1.48E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.38E-03	2.67E-03	2.81E-03	2.83E-03	2.52E-03
GB_Wall	0.0	0.0	3.97E-07	2.02E-04	1.51E-03	2.18E-03	2.49E-03	2.75E-03	2.75E-03	2.70E-03	2.64E-03	2.25E-03
Ht_Wall	3.92E-06	1.70E-04	2.46E-03	1.68E-02	2.24E-02	1.71E-02	1.57E-02	1.75E-02	1.55E-02	1.46E-02	1.39E-02	1.13E-02
Uterus	0.0	0.0	5.54E-07	4.61E-05	1.49E-04	2.86E-04	4.15E-04	5.03E-04	5.50E-04	5.79E-04	6.34E-04	6.34E-04

2. Sumber pada kulit

Specific Absorbed Fraction of Photon Energy in kg-1: Recommended Values for Age 15 Male or Adult Female

Source = Skin												
Target	Energy (MeV)											
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Adrenals	4.56E-07	1.96E-05	2.81E-04	1.29E-03	2.02E-03	1.95E-03	2.20E-03	2.37E-03	2.39E-03	2.32E-03	2.23E-03	1.91E-03
UB_Wall	4.69E-06	9.89E-05	8.60E-04	3.01E-03	4.64E-03	4.42E-03	3.99E-03	3.55E-03	3.22E-03	2.97E-03	2.80E-03	2.36E-03
Bone Sur	1.81E-03	6.37E-03	1.19E-02	1.81E-02	1.61E-02	8.58E-03	5.55E-03	4.23E-03	4.04E-03	3.99E-03	3.89E-03	3.37E-03
Brain	1.43E-05	8.47E-05	2.99E-04	1.77E-03	2.71E-03	2.35E-03	2.47E-03	2.90E-03	2.86E-03	2.61E-03	2.40E-03	1.98E-03
Breasts	1.27E-02	1.97E-02	2.00E-02	1.31E-02	6.25E-03	4.11E-03	4.41E-03	5.04E-03	4.85E-03	4.51E-03	4.23E-03	3.63E-03
St_Wall	6.30E-06	1.09E-04	8.29E-04	2.78E-03	4.09E-03	3.85E-03	3.49E-03	3.13E-03	2.85E-03	2.63E-03	2.49E-03	2.10E-03
SI_Wall	2.59E-09	1.33E-06	1.11E-04	8.02E-04	1.81E-03	1.84E-03	1.90E-03	2.10E-03	2.19E-03	2.21E-03	2.18E-03	1.91E-03
ULI_Wall	0.0	3.92E-06	1.90E-04	1.66E-03	3.51E-03	3.62E-03	3.29E-03	2.92E-03	2.66E-03	2.46E-03	2.33E-03	1.98E-03
LLI_Wall	1.34E-05	8.55E-05	3.18E-04	2.03E-03	4.14E-03	4.15E-03	3.73E-03	3.29E-03	2.98E-03	2.75E-03	2.60E-03	2.20E-03
Kidneys	2.28E-05	2.47E-04	1.34E-03	3.02E-03	2.65E-03	2.15E-03	2.39E-03	2.66E-03	2.68E-03	2.65E-03	2.56E-03	2.07E-03
Liver	4.08E-06	7.03E-05	5.30E-04	2.01E-03	2.45E-03	2.13E-03	2.26E-03	2.52E-03	2.60E-03	2.53E-03	2.42E-03	2.13E-03
ET1-bas	0.0	2.11E-05	4.76E-04	2.47E-03	2.97E-03	2.56E-03	2.76E-03	2.94E-03	2.84E-03	2.66E-03	2.54E-03	2.36E-03
ET2-bas	0.0	2.11E-05	4.76E-04	2.47E-03	2.97E-03	2.56E-03	2.76E-03	2.94E-03	2.84E-03	2.66E-03	2.54E-03	2.36E-03
LN-ET	0.0	2.11E-05	4.76E-04	2.47E-03	2.97E-03	2.56E-03	2.76E-03	2.94E-03	2.84E-03	2.66E-03	2.54E-03	2.36E-03
BBI-bas	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
BBI-sec	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
bbe-sec	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
AI	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
LN-Th	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
LN-Tiss	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
Lung NP	0.0	2.11E-05	4.76E-04	2.47E-03	2.97E-03	2.56E-03	2.76E-03	2.94E-03	2.84E-03	2.66E-03	2.54E-03	2.36E-03
Lung_TB	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
Lung_P	2.72E-06	6.31E-05	5.87E-04	2.45E-03	2.80E-03	2.26E-03	2.29E-03	2.83E-03	2.60E-03	2.45E-03	2.33E-03	1.97E-03
Muscle	4.93E-03	7.55E-03	7.88E-03	6.46E-03	4.34E-03	3.20E-03	3.22E-03	3.65E-03	3.67E-03	3.43E-03	3.19E-03	2.61E-03
Ovaries	0.0	2.82E-08	2.36E-05	5.35E-04	1.69E-03	1.78E-03	1.88E-03	2.02E-03	2.17E-03	2.15E-03	2.05E-03	1.62E-03
Pancreas	2.20E-10	2.33E-07	3.26E-05	5.79E-04	1.64E-03	1.77E-03	1.87E-03	2.02E-03	2.16E-03	2.16E-03	2.07E-03	1.66E-03
R_Marrow	3.98E-04	1.27E-03	1.88E-03	2.41E-03	2.67E-03	2.44E-03	2.66E-03	2.99E-03	3.17E-03	2.97E-03	2.79E-03	2.51E-03
Skin	2.62E-01	1.34E-01	7.27E-02	2.86E-02	1.07E-02	6.89E-03	7.82E-03	8.72E-03	8.54E-03	8.02E-03	7.51E-03	6.19E-03
Spleen	1.54E-06	3.84E-05	3.76E-04	1.71E-03	2.38E-03	2.04E-03	2.15E-03	2.49E-03	2.53E-03	2.40E-03	2.28E-03	2.08E-03
Testes	2.88E-03	1.35E-02	2.09E-02	1.73E-02	8.98E-03	5.79E-03	6.04E-03	6.69E-03	6.14E-03	5.52E-03	5.15E-03	4.72E-03
Thymus	1.27E-05	2.14E-04	1.59E-03	3.60E-03	3.26E-03	2.68E-03	2.89E-03	3.21E-03	3.26E-03	3.03E-03	2.83E-03	2.52E-03
Thyroid	0.0	2.11E-05	4.76E-04	2.47E-03	2.97E-03	2.56E-03	2.76E-03	2.94E-03	2.84E-03	2.66E-03	2.54E-03	2.36E-03
GB_Wall	7.25E-09	2.24E-06	1.31E-04	1.38E-03	3.22E-03	3.46E-03	3.16E-03	2.80E-03	2.55E-03	2.36E-03	2.24E-03	1.90E-03
Ht_Wall	2.07E-05	1.31E-04	4.85E-04	1.60E-03	2.39E-03	2.17E-03	2.24E-03	2.53E-03	2.51E-03	2.40E-03	2.30E-03	2.09E-03
Uterus	1.85E-09	6.45E-07	4.12E-05	7.21E-04	1.82E-03	1.89E-03	1.96E-03	2.22E-03	2.19E-03	2.15E-03	2.10E-03	1.88E-03

3. Sumber pada rusuk

Specific Absorbed Fraction of Photon Energy in kg-1: Recommended Values for Age 15 Male or Adult Female

Source = T_Bone-S	Energy (MeV)											
Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Adrenals	2.12E-05	1.55E-03	6.26E-03	1.23E-02	1.54E-02	1.31E-02	1.30E-02	1.40E-02	1.28E-02	1.13E-02	1.04E-02	9.32E-03
UB_Wall	0.0	1.84E-07	5.79E-05	1.81E-03	5.39E-03	6.49E-03	4.57E-03	4.45E-03	3.75E-03	3.41E-03	3.29E-03	3.25E-03
Bone Sur	1.66E-01	1.62E-01	1.53E-01	1.25E-01	7.35E-02	2.83E-02	1.71E-02	1.48E-02	1.37E-02	1.27E-02	1.18E-02	9.85E-03
Brain	7.12E-04	2.29E-03	4.64E-03	7.83E-03	7.01E-03	5.27E-03	5.30E-03	5.46E-03	5.15E-03	4.80E-03	4.52E-03	3.78E-03
Breasts	1.95E-05	5.37E-04	1.75E-03	2.80E-03	3.10E-03	2.72E-03	2.71E-03	3.33E-03	3.28E-03	3.00E-03	2.80E-03	2.48E-03
St_Wall	8.88E-05	2.62E-04	5.63E-04	1.66E-03	3.89E-03	4.79E-03	4.46E-03	4.13E-03	3.96E-03	3.70E-03	3.52E-03	3.37E-03
SI_Wall	4.32E-04	1.26E-03	2.78E-03	7.15E-03	1.16E-02	1.12E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.21E-03	8.37E-03	7.73E-03	6.32E-03
ULI_Wall	1.03E-03	1.85E-03	2.81E-03	6.19E-03	9.59E-03	9.72E-03	8.76E-03	7.78E-03	7.11E-03	6.77E-03	6.49E-03	5.64E-03
ILI_Wall	3.86E-04	4.22E-03	1.12E-02	1.72E-02	1.63E-02	1.30E-02	1.22E-02	1.27E-02	1.15E-02	1.04E-02	9.54E-03	7.71E-03
Kidneys	1.58E-06	4.22E-04	2.34E-03	6.83E-03	1.05E-02	9.87E-03	9.50E-03	1.01E-02	9.16E-03	8.56E-03	8.07E-03	6.58E-03
Liver	5.41E-05	3.51E-04	1.04E-03	2.80E-03	4.74E-03	5.07E-03	5.02E-03	5.00E-03	4.65E-03	4.35E-03	4.11E-03	3.53E-03
ET1-bas	2.12E-07	1.58E-05	3.36E-04	2.24E-03	4.34E-03	4.43E-03	4.19E-03	4.45E-03	4.08E-03	3.84E-03	3.67E-03	3.21E-03
ET2-bas	2.12E-07	1.58E-05	3.36E-04	2.24E-03	4.34E-03	4.43E-03	4.19E-03	4.45E-03	4.08E-03	3.84E-03	3.67E-03	3.21E-03
LN-ET	2.12E-07	1.58E-05	3.36E-04	2.24E-03	4.34E-03	4.43E-03	4.19E-03	4.45E-03	4.08E-03	3.84E-03	3.67E-03	3.21E-03
BBI-bas	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
BBI-sec	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
bbe-sec	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
AI	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
LN-Th	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
Lung_Tiss	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
Lung NP	2.12E-07	1.58E-05	3.36E-04	2.24E-03	4.34E-03	4.43E-03	4.19E-03	4.45E-03	4.08E-03	3.84E-03	3.67E-03	3.21E-03
Lung_TB	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
Lung_P	1.77E-05	2.67E-04	1.83E-03	5.95E-03	7.84E-03	6.39E-03	6.12E-03	6.38E-03	5.75E-03	5.26E-03	4.93E-03	4.17E-03
Muscle	6.24E-04	1.78E-03	3.25E-03	5.44E-03	6.29E-03	5.60E-03	5.52E-03	5.59E-03	5.35E-03	4.99E-03	4.67E-03	3.92E-03
Ovaries	9.73E-10	8.46E-05	2.19E-03	1.08E-02	1.58E-02	1.41E-02	1.23E-02	1.19E-02	1.08E-02	1.01E-02	9.38E-03	7.22E-03
Pancreas	9.23E-07	3.80E-05	5.31E-04	3.21E-03	7.26E-03	7.93E-03	7.63E-03	7.64E-03	6.58E-03	6.04E-03	5.74E-03	5.09E-03
R_Marrow	7.58E-02	6.72E-02	5.89E-02	4.48E-02	3.12E-02	2.45E-02	2.48E-02	2.56E-02	2.35E-02	2.16E-02	2.01E-02	1.64E-02
Skin	3.98E-04	1.27E-03	1.88E-03	2.41E-03	2.67E-03	2.44E-03	2.66E-03	2.99E-03	3.17E-03	2.97E-03	2.79E-03	2.51E-03
Spleen	1.93E-07	1.55E-04	9.37E-04	2.96E-03	5.10E-03	5.40E-03	5.32E-03	5.47E-03	4.75E-03	4.51E-03	4.37E-03	3.81E-03
Testes	0.0	1.44E-08	9.51E-06	3.60E-04	1.69E-03	2.38E-03	2.48E-03	2.64E-03	2.60E-03	2.29E-03	2.08E-03	1.86E-03
Thymus	2.87E-05	3.14E-04	1.71E-03	3.85E-03	4.80E-03	4.53E-03	4.38E-03	4.68E-03	4.42E-03	4.09E-03	3.82E-03	3.19E-03
Thyroid	2.12E-07	1.58E-05	3.36E-04	2.24E-03	4.34E-03	4.43E-03	4.19E-03	4.45E-03	4.08E-03	3.84E-03	3.67E-03	3.21E-03
GB_Wall	0.0	7.00E-07	1.08E-04	2.05E-03	5.55E-03	5.53E-03	4.75E-03	5.64E-03	5.05E-03	4.62E-03	4.36E-03	3.64E-03
Ht_Wall	3.63E-06	1.58E-04	8.71E-04	3.04E-03	5.54E-03	5.66E-03	5.45E-03	5.36E-03	4.91E-03	4.53E-03	4.28E-03	3.86E-03
Uterus	0.0	1.26E-06	1.85E-04	3.49E-03	9.20E-03	1.00E-02	9.17E-03	8.27E-03	7.32E-03	6.55E-03	6.04E-03	5.16E-03

LAMPIRAN 6

Data material yang digunakan dalam simulasi MCNPX

Tabel Material untuk Kolimator (Fauziah, 2013)

Unsur		ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
Graphite		6000	1,000000
Aluminium		13027	1,000000
Udara	N	7014	0,755268
	C	6000	0,000124
	O	8016	0,231781
	Ar	18000	0,012827

Tabel Material untuk Kulit (Setiyadi, 2015)

Unsur		ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
H		1001	0,619966
C		6000	0,118059
N		7014	0,020589
O		8016	0,240350
Na		11023	0,000019
Mg		12000	0,000015
P		15031	0,000066
S		16000	0,000308
Cl		17000	0,000468
K		19000	0,000135
Ca		20000	0,000023
Fe		26000	0,000001
Zn		30000	0,000001

Tabel Material untuk Jaringan Payudara (Rucker *et.al*, 2011)

Unsur		ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
H		1001	0,62577765
C		6000	0,16448083
N		7014	0,01274521
O		8016	0,19600570
Na		11023	0,00025883
P		15031	0,00019211
S		16000	0,00037117
Cl		17000	0,00016784
Boron		5010	6,1928E-07

Tabel Material untuk PTV (Rucker et.al, 2011)

Unsur	ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
H	1001	0,62577766
C	6000	0,16448083
N	7014	0,01274522
O	8016	0,19600571
Na	11023	0,00025884
P	15031	0,00019212
S	16000	0,00037117
Cl	17000	0,00016785
Boron-10	5010	6,1928E-07

Tabel Material untuk CTV (Rucker et.al, 2011)

Unsur	ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
H	1001	0,61396927
C	6000	0,13999958
N	7014	0,02008333
O	8016	0,22231441
P	15031	0,00363276
Boron-10	5010	6,5056E-07

Tabel Material untuk GTV (Rucker et.al, 2011)

Unsur	ZAid	Fraksi atom atau Fraksi massa
H	1001	0,61395529
C	6000	0,13999639
N	7014	0,02008287
O	8016	0,22230935
P	15031	0,00363268
Boron-10	5010	2,34186E-05